



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

ZKRATOVÁ ODOLNOST ODPOJOVAČE TYPU KBE, 38 KV, 3150 A

SHORT-CIRCUIT RESISTANCE OF THE DISCONNECTOR KBE, 38 KV, 3150 A

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Antonie Šťastná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Studentka: Antonie Štastná

ID: 240810

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Zkratová odolnost odpojovače typu KBE, 38 kV, 3150 A

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s elektrickými přístroji vn z produkce IVEP, a.s.
2. Nastudujte ČSN příslušné k odpojovačům.
3. Vypočítejte silové účinky nadproudů na konkrétní odpojovač KBE, 38 kV, 3150 A.
4. Posuďte vypočítané silové účinky s firemní zkouškou zkratové odolnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na výpočty elektrodynamických sil a krátkodobého oteplení pro odpojovač firmy IVEP a.s. v rámci problematiky zkratové odolnosti. V první části je teoretický souhrn spínacích přístrojů vysokého napětí, jejich dělení a funkce. V další části je popsána problematika zkratových proudů a třetí část obsahuje seznámení s přístroji firmy IVEP.

Ve čtvrté části jsou z příslušných norem souvisejících s tématem práce vybrány a popsány podstatné informace ovlivňující zkoušku zkratové odolnosti odpojovače KBE, 38 kV, 3150 A.

Hlavní část práce se věnuje výpočtům elektrodynamických sil působících na příslušný odpojovač a výpočet krátkodobého oteplení v kritických místech proudovodné dráhy. V práci jsou dosažené výsledky okomentovány a v případě nerovnosti s normami jsou navrženy možné úpravy.

Klíčová slova

Zkratová odolnost, odpojovač, nadproud, elektrodynamické účinky, spínací přístroj, norma, výpočty, firma IVEP, a.s.

Abstract

The bachelor's thesis is focused on the calculations of electrodynamic forces and short-term warming for the disconnecter of the company IVEP a.s. within the framework of the issue of short-circuit resistance. The first part contains a theoretical summary of high voltage switching devices, their division and functions. The next part describes the problem of short-circuit currents, and the third part contains an introduction to IVEP devices. In the fourth part, essential information affecting the short-circuit resistance test of the KBE disconnecter, 38 kV, 3150 A, is selected and described from the relevant standards related to the topic of the thesis.

The main part of the thesis is devoted to calculations of electrodynamic forces affecting on the relevant disconnecter and calculation of short-term heating in critical places of the current-carrying path. In the thesis, the achieved results are commented on and possible adjustments are suggested in case of inequality with the standards.

Keywords

Immunity of short circuit, disconnecter, overcurrent, electrodynamic effects, switching device, standard, calculations, company IVEP, a.s.

Bibliografická citace

ŠŤASTNÁ, Antonie. *Zkratová odolnost odpojovače typu KBE, 38 kV, 3150 A* [online]. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160590>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Bohuslav Bušov.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Antonie Šťastná
VUT ID studenta:	240 810
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Zkratová odolnost odpojovače typu KBE, 38 kV, 3150 A

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:

podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi, CSc. a konzultantu firmy IVEP Ing. Jáchymu Vlkovi za všechny rady, poskytnuté informace, věnovaný čas při konzultacích a navedení správného směru při vypracování semestrální práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	10
ÚVOD	11
1. TEORETICKÝ ROZBOR SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ VN A VVN.....	12
1.1.1 Odpojovače	12
1.1.2 Zkratovače	12
1.1.3 Úsečníky.....	13
1.1.4 Odpínače.....	13
1.1.5 Výkonové vypínače.....	13
1.2 KONSTRUKCE SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ	13
1.2.1 Proudovodná část	13
1.2.2 Izolace přístroje	13
1.2.3 Spínací mechanismus	14
1.2.4 Zhášedla.....	14
1.2.5 Výzbroj.....	14
1.3 PROVOZNÍ PODMÍNKY	14
1.3.1 Vlivy pracovního prostředí.....	15
1.3.2 Vlivy druhu provozu přístroje	15
2. PROBLEMATIKA ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....	16
2.1 PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	16
2.1.1 Symetrický zkrat	17
2.1.2 Nesymetrický zkrat	17
2.2 ROZDĚLENÍ ZKRATŮ	18
2.3 DYNAMICKÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU	19
2.3.1 Vznik elektrodynamických sil.....	19
2.3.2 Vliv reálných délek a průřezů	19
2.4 KRÁTKODOBÉ OTEPLENÍ.....	21
2.4.1 Zvolený postup výpočtu.....	21
2.4.2 Zvýšení elektrického odporu	22
3. FIRMA IVEP, A.S.....	23
3.1 HISTORIE FIRMY	23
3.2 ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE VN Z PRODUKCE IVEP, A.S.	23
3.2.1 Technické údaje přístrojů.....	23
3.2.2 Vnitřní odpojovače.....	24
3.2.3 Venkovní odpojovače	25
4. NORMY ČSN PŘÍSLUŠNÉ K ODPOJOVAČŮM	26
4.1 NORMÁLNÍ A ZVLÁŠTNÍ PRACOVNÍ PODMÍNKY	26
4.1.1 Venkovní provedení spínacích a řídicích zařízení pro normální pracovní podmínky	26
4.1.2 Venkovní provedení spínacích a řídicích zařízení pro zvláštní pracovní podmínky.....	27
4.2 JMENOVITÉ HODNOTY	27

4.3	KONSTRUKCE A PROVEDENÍ	28
4.4	TYPOVÉ ZKOUŠKY	28
4.4.1	<i>Druhy typových zkoušek.....</i>	29
4.5	TYPOVÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÝM A DYNAMICKÝM VÝDRŽNÝM PROUDEM	30
4.5.1	<i>Uspořádání zkušebního obvodu a zařízení.....</i>	30
4.5.2	<i>Průběh zkoušky</i>	30
5.	VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ODPOJOVAČE KBE.....	32
5.1	ČÁSTI ODPOJOVAČE.....	32
5.1.1	<i>Rovnoběžné úseky</i>	32
5.1.2	<i>Pravoúhlé záhyby.....</i>	33
5.1.3	<i>Kontaktní styky.....</i>	33
5.1.4	<i>Izolátory</i>	33
5.2	SÍLY PŮSOBÍCÍ NA NŮŽ.....	34
5.2.1	<i>Činitel uspořádání vodičů konečné délky.....</i>	35
5.2.2	<i>Činitel tvaru průřezu</i>	35
5.2.3	<i>Výpočet silových účinků na nůž.....</i>	36
5.3	SÍLY PŮSOBÍCÍ NA L-ZÁHYB	37
5.3.1	<i>Dosazení hodnot.....</i>	38
5.3.2	<i>Účinky na izolátor.....</i>	39
5.4	DVA ROVNOBĚŽNÉ NESOUBĚŽNÉ JINAK DLOUHÉ VODIČE	40
5.5	VÝPOČET KONTAKTNÍCH STYKŮ.....	42
5.5.1	<i>Kontaktní styk praporec-nůž.....</i>	43
5.5.2	<i>Kontaktní styk praporec-spojovací destička</i>	45
5.6	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ ELEKTRODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ	46
6.	VÝPOČET KRÁTKODOBÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE KBE.....	47
6.1	ZMĚNY PRŮŘEZU	47
6.1.1	<i>Změny průřezu – praporec.....</i>	47
6.1.2	<i>Změny průřezu – nůž.....</i>	50
6.2	KONTAKTNÍ STYK.....	51
6.3	ZLEPŠENÍ KONTAKTNÍHO STYKU.....	53
6.3.1	<i>Změna materiálu</i>	53
6.3.2	<i>Změna proudové hustoty.....</i>	53
6.3.3	<i>Rozdělení proudovodné dráhy</i>	53
6.4	ZVĚTŠENÍ ODPORU PO ZKRATU	54
6.4.1	<i>Odpor nože.....</i>	54
	ZÁVĚR.....	55
	LITERATURA.....	56
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Průběh symetrického zkratového proudu	17
2.2	Průběh nesymetrického zkratového proudu	17
2.3	Druhy zkratů [8]:	18
2.4	Závislost činitele tvaru průřezu k_p vodiče na uspořádání proudovodičů [1]	20
2.5	Souměrné (a) a nesouměrné (b) uspořádání vodičů pro činitel konečné délky k_d [1]	20
2.6	Obdélníkový průřez vodičů „nastojato“ a „naležato“	22
3.1	3D zobrazení nožového venkovního odpojovače typu KBE	25
5.1	Proudovodná dráha jedné fáze odpojovače KBE	32
5.2	Kontaktní místo odpojovače typu KBE před zkratovou zkouškou	33
5.3	Soustava nožů jedné fáze	34
5.4	Určení orientace magnetických indukčních čar podle pravidla pravé ruky pro soustavu nožů jedné fáze	36
5.5	Úseky 2 a 3 proudovodné dráhy odpojovače KBE	37
5.6	Určení orientace magnetických indukčních čar podle pravidla pravé ruky pro přívodní a vývodní praporec jedné fáze	38
5.7	Rozložení sil na pravoúhlý záhyb přívodního a vývodního praporce jedné fáze	38
5.8	Rozložení vypočtených sil na pravoúhlý záhyb praporce	39
5.9	Úseky 1, 3 a 4 proudovodné dráhy odpojovače KBE	40
5.10	Uspořádání dvou rovnoběžných nesouběžných vodičů jiné délky	40
5.11	Odpudivé síly v proudové úžině (a) a idealizované proudové úžině (b) [9]	43
5.12	Kontaktní styková plocha mezi praporcem a nožem	43
5.13	Rozložení vypočtených sil na pár nožů jedné fáze	44
5.14	Kontaktní styková plocha mezi praporcem a spojovací destičkou	45
6.1	Označená kritická místa pro krátkodobé oteplení na praporci	47
6.2	Označená kritická místa pro krátkodobé oteplení na noži	50
6.3	Kontaktní místo odpojovače typu KBE po zkratové zkoušce	52

SEZNAM TABULEK

3.1	Pracovní podmínky pro většinu venkovních spínacích přístrojů	25
5.1	Hodnoty rozměrů zakótovaných na obrázku 5.3	35
5.2	Rozměry jednoho praporce	38
5.3	Důležité katalogové parametry izolátoru CBSZ2-24-00	40
5.4	Rozměry úhlopříček mezi úseky naznačených v obrázku 5.9	41
6.1	Fyzikální a elektrické veličiny použitých elektrovedných materiálů	47
6.2	Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v jednotlivých místech na praporci.....	49
6.3	Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v jednotlivých místech na noži	51
6.4	Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v pohyblivém kontaktu	52

ÚVOD

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektrodynamických a tepelných účinků zkratového proudu na proudovodnou dráhu odpojovače KBE. Pro řešení problematiky jsou použity analytické výpočty.

V úvodní kapitole jsou analyzovány konstrukční části spínacích přístrojů, které tvoří proudovodnou dráhu, a dělení přístrojů podle funkce spínání a schopnosti vypořádat se s elektrickým obloukem a účinky zkratového proudu. Pro odpojovač KBE firmy IVEP je základní funkcí vydržet v sepnutém stavu při průchodu jmenovitého i zkratového proudu. Kontakty se nesmí rozpojit, pokud obvodem protéká elektrický proud.

Magnetická pole vznikají kolem každého vodiče, kterým protéká proud. Vzájemným působením těchto polí vznikají na vodiči dynamické síly, které při zkratových hodnotách proudů dosahují nebezpečných hodnot a mohou způsobit poškození proudovodné dráhy. Jednotlivé fáze odpojovače jsou sestaveny ze dvou párů nožů, které na sebe vzájemně působí a ovlivňují kritická místa, kterými jsou pracovní kontakty, kde se proudovodná dráha rozděluje do mikroskopických úžin s velkým stykovým odporem, a dochází ke vzniku odpudivé síly, která je označovaná také jako Holmova síla. Další silně silově namáhanou částí jsou pravoúhlé záhyby. Problematikou elektrodynamických účinků se zabývá pátá kapitola.

Velká hodnota proudu způsobuje také rychlé zahřátí proudovodných částí na vysoké teploty. Proto se z hlediska zkratového proudu řeší krátkodobé oteplení v nejkritičtějších místech proudovodné dráhy, tedy v kontaktním pracovním styku a v nejužších místech (změny průřezu). Touto problematikou se zabývá šestá kapitola.

Všechny výsledky jsou v jednotlivých kapitolách porovnány s požadavky a předpisy podle příslušných norem, které jsou blíže popsány ve čtvrté části.

1. TEORETICKÝ ROZBOR SPÍNACÍCH PŘÍSTROJŮ

Elektrické spínací přístroje slouží k ovládání a řízení elektrických obvodů, ve kterých se nacházejí. S pomocí elektrických přístrojů lze spínat, chránit, nebo řídit a ovládat stavy obvodů nebo zařízení. Hlavní charakteristiky spínacích přístrojů:

- 1) Viditelné spojení nebo rozpojení obvodu v nezátíženém stavu;
- 2) Dokážou v zatíženém stavu zapínat nebo vypínat elektrický proud;
- 3) Jejich použitím dosáhneme požadovaného stavu obvodu nebo ho řídíme vhodným způsobem;
- 4) Elektrická ochrana pro živé bytosti před úrazem elektrickým proudem;
- 5) Jištění elektrických zařízení proti nežádoucím důsledkům poruchových stavů obvodu;

Další kapitoly se věnují především jistícím prvkům používaným v sítích vysokého napětí a velmi vysokého napětí. [1]

1.1 Základní rozdělení spínacích přístrojů vn a vvn

Na základě předchozích charakteristik dle [1] dále dělíme spínací přístroje podle jejich funkce spínání, jmenovitých parametrů, schopnosti vypořádat se s elektrickým obloukem a místa použití.

1.1.1 Odpojovače

U vn a vvn sítí nestačí pouhé přerušení proudu vypínačem v obvodu, ale je vyžadováno zajištění bezpečného odpojení, tzn. viditelné rozpojení obvodu v nezátíženém stavu. Odpojovače jsou jedny z mechanických spínacích přístrojů, které tuto funkci vykonávají.

Odpojovač neobsahuje zhasací komoru za účelem uhasnutí elektrického oblouku, právě z důvodu, že odpojovač je určen do nezátíženého stavu. To znamená, že pokud je elektrický obvod zatížen a tím pádem spínacím prvkem protéká elektrický proud, nesmí u odpojovače v této situaci dojít k odpojení.

Mezi odpojovače lze řadit uzemňovače, které slouží k viditelnému uzemnění daného obvodu nebo zařízení v nezátíženém stavu. Používá se to preventivně pro ochranu obsluhy.

1.1.2 Zkratovače

V principu je lze označit jako uzemňovače se zkratovou zapínací schopností. Nejčastěji se používají ve vnitřních rozvodnách vn jako bezpečnostní zařízení ve vstupních polích rozvaděčů.

1.1.3 Úsečníky

Používají se pro ovládání úseků vedení vn, kde jsou přechody z venkovního vedení na kabelové. Jejich další použití je odpojování stožárových transformátorů.

Dokážou spínat nezatížené transformátory, kabelové vedení a vedení vn v normálním stavu, tzn. vedením protéká jmenovitý proud. Bezpečnostní podmínky jsou stejné jako pro odpojovače.

1.1.4 Odpínače

Jejich základní funkce je odpojit obvod v normálním stavu a v případě poruchového stavu zajistit schopnost uhasit elektrický oblouk.

1.1.5 Výkonové vypínače

Mají schopnost spínat obvody jak při nezatíženém, tak i zatíženém stavu, a také zároveň spínat v různých poruchových stavech včetně zkratů a jejich důsledků.

1.2 Konstrukce spínacích přístrojů

Každá konstrukce spínacího přístroje se skládá z několika základních konstrukčních částí:

- a) Proudovodná část;
- b) Izolace;
- c) Spínací mechanismus;

Některé druhy spínacích přístrojů mohou být doplněny zhášecí komorou a výzbrojí (ověšení přístroje). [1]

1.2.1 Proudovodná část

Je tvořena částmi přístroje, kterými za normálního stavu elektrického obvodu protéká elektrický proud. Jsou to svorky přístroje, kontakty a spojovací části.

Tyto části jsou namáhány jak tepelně, tak mechanicky.

Tepelné namáhání je způsobeno procházejícím proudem. Mechanické namáhání je způsobeno hlavně provozním spínáním tahem pružin, brzděním a rozběhem setrvačných částí obvodu, dále při zapínání četnými nárazy kontaktů a elektrodynamickými silami mezi proudovodnými částmi, a to zejména při zkratech.

1.2.2 Izolace přístroje

Izolační části zajišťují dostatečnou elektrickou i mechanickou pevnost proudovodných částí, a to izolovaně od země a od vodičů rozdílných fází. Pro spínací přístroje se používají izolační materiály ve všech skupenstvích. U plynů je to převážně vzduch, u kapalin olej a u pevných látek různé druhy organických a anorganických látek.

Základem pro elektrické oddělení vodivých částí je izolační materiál vždy pevného skupenství. U spínacích pohybů kontaktů je nezbytné používat izolanty plynného a kapalného skupenství.

1.2.3 Spínací mechanismus

Pomocí spínacího mechanismu dosahujeme stavů kontaktů, zapnuto a vypnuto. Kontakty bývají nejvíce namáhaným místem, a to jak mechanicky, tak tepelně.

Konstrukce a princip spínacích mechanismů mají velkou škálu stupňů složitosti. Nejjednodušší jsou nožové odpojovače a spínače, kde se k ovládní používá přímo spínací tyč nebo izolační rukojeť. Naopak nejsložitější jsou konstrukce a mechanismy zařízení pro opětné zapínání (OC–O).

Důležitou částí spínacího mechanismu je nosný rám, na němž jsou různými způsoby upevněny spínací póly přístroje. U spínacích přístrojů určených do vn, vvn a zvn bývá zpravidla kovový, zatímco u přístrojů určených ke spínání obvodů mn a nn bývá rám izolační.

1.2.4 Zhášedla

Vypínací schopnost spínacích přístrojů určuje, jak velký proud dokáže daný přístroj ještě spolehlivě vypnout. Tuto krajní hodnotu proudu označujeme jako výdržný krátkodobý proud.

Vzduch, jako zhašecí izolační médium, má velice malou vypínací schopnost v řádech několika desítek nebo stovek ampér. Proto se k posílení vypínací schopnosti používají prostředí málo vodivých látek, mezi které řadíme různé plyny nebo kapaliny (hlavně olej). Tímto způsobem se snažíme co nejvíce zkrátit dobu hoření oblouku a zmenšit tím nežádoucí účinky na kontakty přístroje.

K tomu účelu slouží zhašedlo, ve kterém je vhodným způsobem využit pomocný plyn nebo kapalina, přičemž jejich vlastností se využívá k intenzivní deionizaci dráhy oblouku.

1.2.5 Výzbroj

Do výzbroje řadíme veškerá rozšíření činnosti spínacích přístrojů o doplňkové funkce, přičemž bez tohoto rozšíření daný přístroj stále splňuje svoji základní funkci.

Výzbrojí jsou různá přídavná zařízení, mezi které řadíme například pomocné signální kontakty, dálkové spouště, nadproudové tepelné i elektromagnetické spouště, dálkové strojní a ruční pohony, ale i různé druhy krytů.

1.3 Provozní podmínky

Provozní podmínky určují způsoby správného zacházení pro provoz a ochranu elektrických zařízení. Podle toho je členíme do dvou skupin. A to podle pracovního prostředí a druhu provozu přístroje. [1]

1.3.1 Vlivy pracovního prostředí

Do pracovního prostředí zahrnujeme veškeré vlastnosti prostoru, ve kterém se daný přístroj nachází. Tato skupina neovlivňuje základ konstrukčního provedení přístroje. V rámci vlivů prostředí lze použít jiný izolační materiál, detailnější povrchovou úpravu nebo ověšení, například speciálními kryty.

Vlastnosti prostoru závisí na podmínkách ovlivňujících správnou činnost zařízení. Podle toho prostředí dělíme na:

- a) Základní = obyčejné – bez vlivů na činnost zařízení;
- b) Jednoduchá – zahrnuje jeden vliv na činnost zařízení;
- c) Složitá – s více jak jedním vlivem na činnost zařízení;

V prvních dvou prostorech se teplota okolí pohybuje v rozmezí od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkost vzduchu je méně jak 80 % a jeho umístění nepřesahuje 1000 metrů nad mořem.

Prostředí jednoduché dělíme dále na:

- a) Studené – teplota ovzduší je pod spodní hranicí $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- b) Horké – teplota ovzduší je nad horní hranicí $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- c) Vlhké – vlhkost vzduchu je víc jak 80 %;
- d) Mokrý – na rozdíl od vlhkého, voda pokrývá zem a stéká po stěnách prostředí;
- e) Prašné – vrstva nevodivého a nehořlavého prachu ovlivňuje činnost zařízení;
- f) Výbušné – hořlavé plyny a páry mohou způsobit výbuch;

Kombinací jednoduchých prostředí vzniká prostředí složitá. Toto platí především ve venkovních prostorech.

1.3.2 Vlivy druhu provozu přístroje

Druh provozu je určen podle počtu spínacích cyklů za určitý časový úsek a závisí na velikosti spínaného proudu. Pro menší četnost spínání používáme pojem provoz občasný, zatímco provoz častý je pro větší počet spínání.

Dle počtu spínacích cyklů za určitý časový úsek dělíme přístroje s provedením lehčím nebo robustnějším, které jsou přísněji mechanicky i elektricky dimenzované.

2. PROBLEMATIKA ZKRATOVÝCH PROUDŮ

Definice zkratu podle normy ČSN EN 60909-0:2002 zní: „náhodné nebo úmyslné vodivé spojení mezi dvěma nebo více vodivými částmi vedoucí k tomu, že rozdíl elektrických potenciálů mezi těmito vodivými částmi je roven nule nebo má hodnotu blízkou nule“.

Při náhodném nebo úmyslném spojení dvou vodivých částí vzniká přechodový odpor, podle jehož velikosti dělíme zkraty na dokonalé (kovové) a nedokonalé. U obou případů dochází k značnému poklesu impedance elektrického obvodu, který se projevuje v celé elektrické síti, a to výrazným zvýšením proudu a snížením napětí. Průchodem zkratového proudu vodičem vznikají nebezpečné děje, a to tepelné a mechanického namáhání, pokles napětí nebo přepětí a indukování napětí přes magnetické pole hlavně do sdělovacích zařízení.

Při průchodu zkratových proudů dochází k překročení dovolených hodnot oteplení, které ohrožuje místo zkratu požárem nebo nežádoucím svařením kontaktů, a také vznikají tak velké elektrodynamické síly, že mohou způsobit například trhání vodičů nebo nežádoucí pohyb kontaktů. Z těchto důvodů je zapotřebí místo vzniku zkratu odpojit od všech elektrických zdrojů v co nejkratším čase. Dobu trvání času zkratu určuje druh použitého ochranného zařízení a pohybuje se od řádu stovek milisekund pro tavné pojistky po několik sekund u jističů se zhašecí komorou.

Hlavní příčinou vzniku zkratu je vznik přepětí v elektrické soustavě. To může nastat například přímým úderem blesku do vedení. Jako provozní přepětí lze definovat přepětí při zemním spojení, při náhlé ztrátě zatížení, při vypínání indukčních proudů nebo při spínacích procesech. Zkraty mohou být také způsobeny různými vadami v elektrických zařízeních připojených k elektrické síti. Mezi tyto vady zahrnujeme opálení a znečištění kontaktů, nesprávnou montáž nebo porušení izolace. [7]

2.1 Průběh zkratového proudu

Ve výpočtech elektrodynamických a tepelných účinků zkratu na proudovodnou dráhu spínacího přístroje je důležitá velikost proudu, který se při zkratu objeví v obvodu. Tato kapitola se věnuje vysvětlení vzniku a průběhu zkratového proudu a vychází z [1].

U střídavých obvodů se silové účinky proudu projevují hlavně ve velikosti amplitudy proudu a frekvence obvodu (sítě).

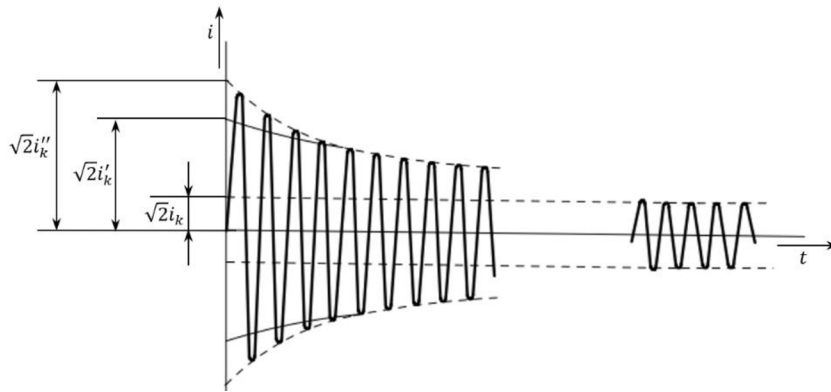
Před ustáleným stavem obvodu dochází k přechodovému jevu. Připojením obvodu ke střídavému napětí se proud mění z nulové hodnoty během času $t = 0$ a dochází k proudovému rázu. Důležitý je předpoklad, že zapnutí vypínače, kterým připojujeme obvod k napětí, nastává okamžitě.

Z hlediska průběhu zkratového proudu se zkraty dělí na dva typy, a to symetrický a nesymetrický zkratový proud.

2.1.1 Symetrický zkrat

Symetrický zkrat vzniká ve chvíli, kdy napětí dosahuje maximální hodnoty a počátek zkratového proudu se nachází v nule. Sinusový průběh dělíme v závislosti na frekvenci dané soustavy a vzdálenosti místa poruchy od zdroje na tři složky:

- 1) **Ustálená složka** $i_k(t)$ se s konstantní amplitudou projevuje při každém zkratu.
- 2) **Přechodová složka** $i'_k(t)$ se projevuje pouze v případech blízkého zkratu. Její amplituda exponenciálně klesá s časem.
- 3) **Rázová složka** $i''_k(t)$ se stejně jako přechodová složka projevuje v případech blízkého zkratu. Projevuje se na začátku zkratu a odeznívá ze všech nejrychleji a její amplituda exponenciálně klesá s časem.

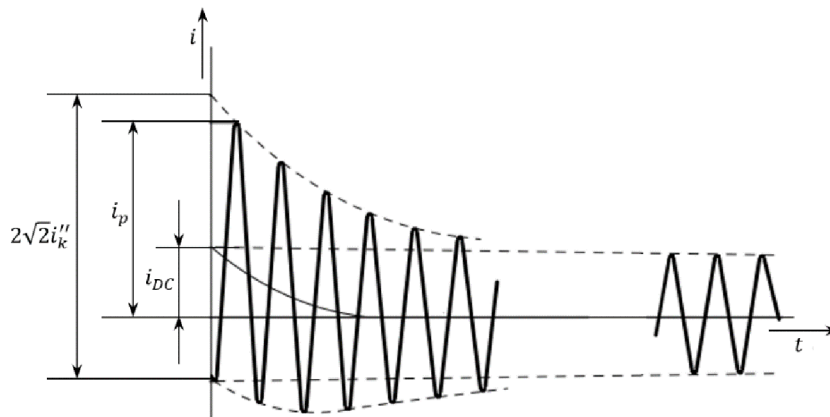


Obrázek 2.1 Průběh symetrického zkratového proudu

2.1.2 Nesymetrický zkrat

Nesymetrický zkrat vzniká ve chvíli, kdy napětí dosahuje nulové hodnoty a počátek zkratového proudu začíná od maximální hodnoty v první amplitudě.

Vzniká aperiodická složka proudu, která způsobuje neharmonický počáteční průběh zkratového proudu. Po jejím doznění se průběh ustálí na harmonický průběh. Stejně jako u symetrického zkratu i zde se projevuje rázová, přechodová a ustálená složka. Další důležitou složkou je stejnosměrná $i_{DC}(t)$ která exponenciálně klesá s časem.

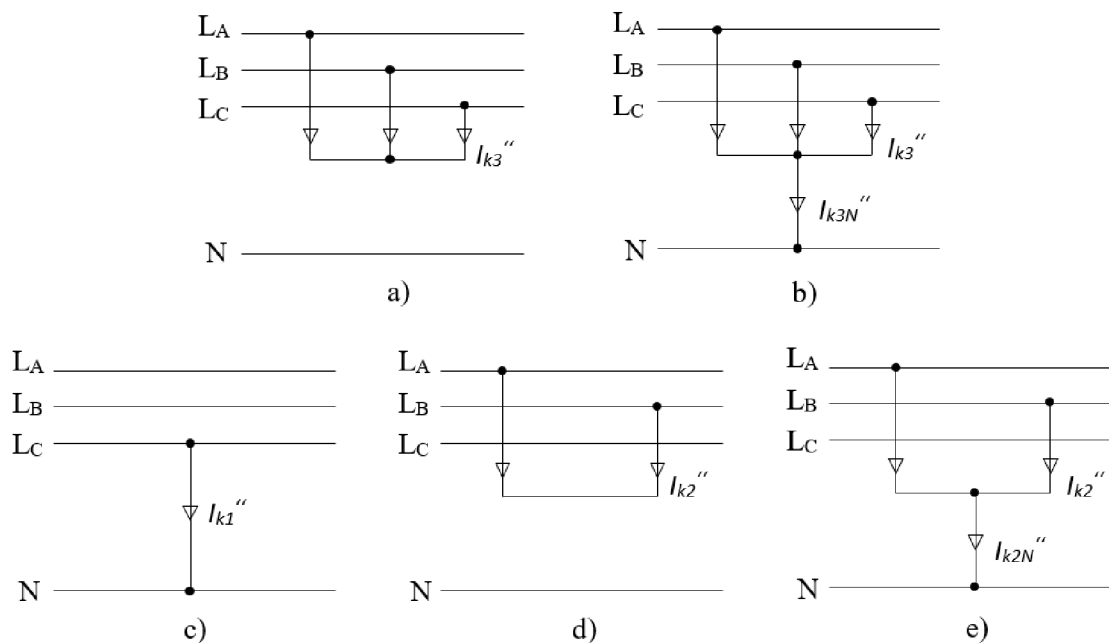


Obrázek 2.2 Průběh nesymetrického zkratového proudu

2.2 Rozdělení zkratů

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, při kterém protéká elektrickým obvodem zkratový proud, který je v blízkosti místa zkratu až několásobně větší než běžný provozní proud. Zkraty lze dělit podle několika kritérií [8]:

- a) Podle velikosti přechodového odporu:
 - Dokonalý zkrat – charakterizován nízkou impedancí přechodového odporu;
 - Nedokonalý zkrat – charakterizován vysokou impedancí, většinou způsoben hořením elektrického oblouku;
- b) Podle místa vzniku zkratu v síti:
 - Blízký zkrat – vzniká blízko zdroje elektrické energie;
 - Vzdálený zkrat – vzniká v takové vzdálenosti od zdroje, kdy je tento jev zanedbatelný díky působení impedancí ostatních prvků soustavy;
- c) Podle způsobu provozu elektrizační soustavy:
 - Souměrný zkrat – trojfázový (Obrázek 2.3-a) a trojfázový účinně nebo neúčinně uzemněný (Obrázek 2.3-b);
 - Nesouměrný zkrat – jednofázový (Obrázek 2.3-c), dvoufázový (Obrázek 2.3-d) a dvoufázový uzemněný (Obrázek 2.3-e).



Obrázek 2.3 Druhy zkratů [8]:

- a) trojfázový, b) trojfázový uzemněný, c) jednofázový, d) dvoufázový, e) dvoufázový uzemněný

2.3 Dynamické účinky elektrického proudu

Elektrodynamické síly se ve většině případů snažíme potlačit jako nežádoucí účinky průchodu proudu. Existují i případy, kdy tyto síly například konstrukčními úpravami elektrického přístroje zvětšujeme (například kontaktní přitlačné síly).

2.3.1 Vznik elektrodynamických sil

Průchodem proudu vodičem vznikají síly, které mechanicky namáhají daný vodič nebo jiné části stejné proudovodné dráhy. Pokud se vlastní mechanická frekvence proudovodné dráhy dostane do rezonance s elektrodynamickou silou, může dojít ještě k většímu namáhání než při samotném průchodu zkratového proudu.

V elektrických přístrojích vznikají důsledkem průchodu proudu elektromagnetická pole, která podle [1] vytvářejí elektrodynamické síly vzájemným působením v případech:

- a) Při více proudových drahách;
- b) Při zakřivení proudové dráhy;
- c) U proudové dráhy nacházející se v blízkosti feromagnetického rozhraní;
- d) Při deformaci proudového pole v proudové dráze změnou jejího průřezu;
- e) Při změně indukčnosti obvodu vyvolané činností elektrického přístroje;
- f) Při průtoku proudu proudovou dráhou.

2.3.2 Vliv reálných délek a průřezů

Každou změnou průřezu vodiče, kterým prochází elektrický proud, dochází k deformaci proudovodné dráhy, a to má za příčinu vznik elektrodynamických sil. Nejčastějšími okolnostmi bývají místa, kde dochází k zúžení proudovodné dráhy, nebo otvory ve vodiči, které se používají k připojení konstrukčních těles nebo dalších částí proudovodné dráhy.

V teorii pro odvozování síly se uvažuje, že vzdálenost dvou vzájemně na sebe působících vodičů je mnohem větší než jejich průměr kruhového průřezu, a jsou nekonečně dlouhé. Pro vodiče pravoúhlého a robustního průřezu se velikosti sil mění, protože magnetické pole těchto typů vodičů se liší od magnetického pole, které budí vodiče s kruhovým průřezem, a jejich délky nejsou nekonečně dlouhé.

Proto se v praxi zavádějí dva korekční činitele. Korekční činitel tvaru průřezu k_p , který je závislý na rozměrech vodičů a jejich vzájemném uspořádání. Pro výpočet tohoto činitele s chybou menší jak 10 % rozlišujeme uspořádání „naležato“;

$$\frac{b}{h} > 1; k_p = 1 + \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}}; \quad (2.1)$$

a uspořádání „nastojato“:

$$\frac{b}{h} \leq 1; k_p = 1 - \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}}; \quad (2.2)$$

kde b je šířka vodičů, h je jejich výška a a je vzdálenost středových os.

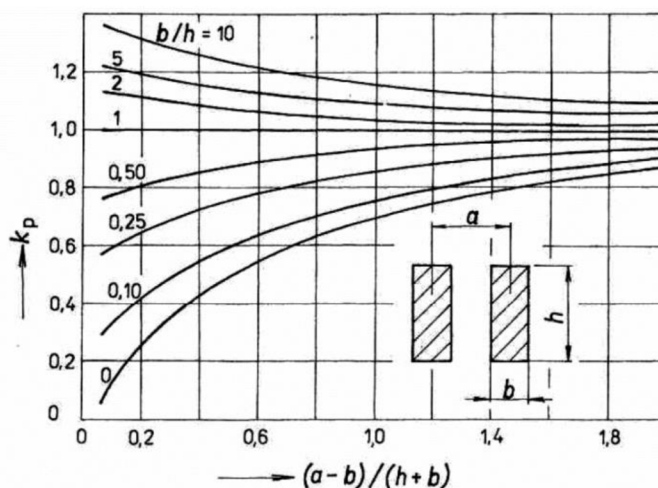
Činitel konečné délky k_d se mění podle konfigurace soustavy vodičů. Dva rovnoběžné nesteré dlouhé vodiče (vlákna) mohou být uspořádány v konstrukci souměrně;

$$k_d = \sqrt{1 - \frac{(l_1 - l_2)^2}{4a^2}} - \sqrt{1 + \frac{(l_1 - l_2)^2}{4a^2}}; \quad (2.3)$$

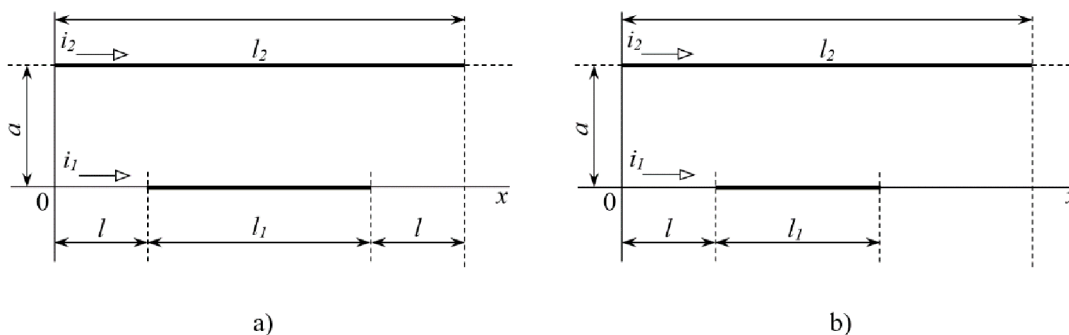
nebo nesouměrně;

$$k_d = \frac{1}{2} \left(\frac{l_1 + l_2}{a} + \sqrt{\frac{(l_2 + l_1)^2}{a^2} + 1} - \frac{l_2}{a} - \sqrt{\frac{l_2^2}{a^2} + 1} \right), \quad (2.4)$$

kde v obou rovnicích l_1 a l_2 jsou délky vodičů ve vzájemném uspořádání, a je vzdálenost středových os vodičů.



Obrázek 2.4 Závislost činitele tvaru průřezu k_p vodiče na uspořádání proudovodičů [1]



Obrázek 2.5 Souměrné (a) a nesouměrné (b) uspořádání vodičů pro činitel konečné délky k_d [1]

2.4 Krátkodobé oteplení

Krátkodobé oteplení je jeden z nežádoucích účinků průchodu zkratového proudu vodičem. Vzniklé teplo během tak krátké doby, po kterou trvají zkraty, nemůže být odvedeno. Nadměrným oteplením, které vzniká při zkratech, může dojít k svaření pohyblivých částí přístrojů (kontakty), měknutí materiálu, poruše izolace, zvětšení odporu proudovodné dráhy a k poklesu mechanické pevnosti vodiče i kontaktů.

Dalším nežádoucím účinkem zkratu je elektrický oblouk, který vzniká při spínání, a to mezi kontakty spínacího přístroje, a tvoří přechodovou část proudovodné části. Vlivem jeho vysoké teploty může dojít k vypaření materiálu kontaktu v místě styku s obloukem, a dochází k snížení životnosti kontaktů a k jejich erozi.

U odpojovače elektrické oblouky nevznikají. Je to způsobeno vlastnostmi a funkcí odpojovače, kdy v zatíženém stavu nesmí odpojovač nikdy vypnout. Rozpojení kontaktu může u odpojovače nastat pouze tehdy, kdy odpojovačem neprochází žádný proud.

2.4.1 Zvolený postup výpočtu

Z hlediska krátkodobého oteplení při zkratovém proudu se v proudovodné dráze řeší nejkritičtější místa;

- 1) Měknutí z hlediska nejužších míst a změn průřezu v proudovodné dráze.
- 2) Vznik svaru v kontaktním styku.

Zvolené postupy výpočtu budou provedeny podle knihy Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů. [9]

Teoretický výpočet krátkodobého oteplení uvažuje vznik zkratu při nejhorších podmínkách okolí, tedy při teplotě okolí 40 °C, a přístroj je v ustáleném stavu. Konečná hodnota maximálního oteplení zkratem T_k se skládá ze tří složek;

$$T_k = T_0 + \theta_n + \theta_k, \quad (2.5)$$

kde T_0 je teplota okolí v době vzniku zkratu, θ_n je oteplení jmenovitým proudem a θ_k je oteplení za dobu zkratu t_k .

Oteplení za dobu zkratu:

$$\theta_k = \frac{R \cdot I^2}{c \cdot V} \cdot t_k, \quad (2.6)$$

kde R je odpor dané části, c je objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku (měrné teplo) a V je jeho objem. Při dosazení za proudovou hustotu:

$$\sigma = I/S, \quad (2.7)$$

dostaneme vztah:

$$\theta_k = \frac{\sigma^2 \cdot \rho_n}{c} \cdot t_k \quad (2.8)$$

kde ρ_n je měrný elektrický odpor při oteplení jmenovitým proudem. Tato hodnota se vypočítá přes přepočet pomocí tabulkových hodnot;

$$\rho_n = \rho_{40} \cdot (1 + \alpha_{40} \cdot \theta_n), \quad (2.9)$$

kde ρ_{40} je měrný elektrický odpor při 40 °C a α_{40} je teplotní činitel odporu při 40 °C.

2.4.2 Zvýšení elektrického odporu

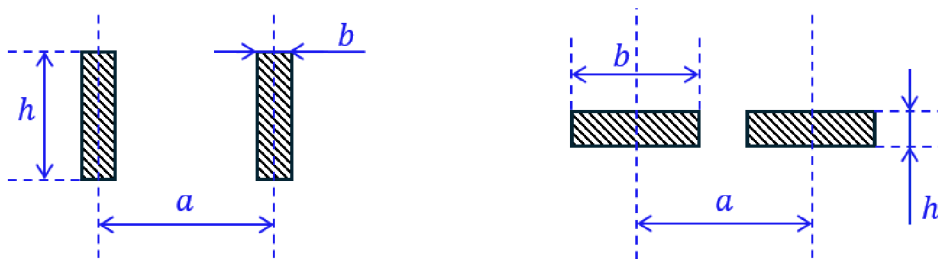
Průchodem elektrického proudu vodičem dochází k srážkám a tření mezi nosiči náboje a částicemi krystalické mřížky materiálu. Při větších proudcích je větší oteplení vodiče a dochází ke zvětšení rozkmitů částic. To má za příčinu zvětšení počtu srážek, a tedy zvýšení elektrického odporu proudovodné dráhy. Odpor je tedy teplotně závislá veličina a vypočítá se podle vztahu;

$$R = \rho_n(\vartheta) \cdot \frac{l}{S}, \quad (2.10)$$

kde l je délka vodiče, S je průřez vodiče a $\rho_n(\vartheta)$ je měrný odpor materiálu vodiče, který je proměnný s teplotou a je definován v tabulkách. Za hodnotu ρ_n lze dosadit **vztah (2.9)** a dostaneme vztah:

$$R = \rho_{40} \cdot (1 + \alpha_{40} \cdot \theta_n) \cdot \frac{l}{S} \quad (2.11)$$

Pokud obvodem prochází střídavý proud, je nutné uvažovat vliv skin efektu, který zajišťuje součinitel povrchového zhuštění k_p , který má dvě složky: $k_p = k_h \cdot k_b$. Podle **obrázku 2.6** činitel k_h je funkcí rozměrů a/h a činitel k_b je funkcí a/b .



Obrázek 2.6 Obdélníkový průřez vodičů „nastojato“ a „naležato“

3. FIRMA IVEP, A.S.

Firma IVEP, a.s. je malou společností specializující se na výrobu již existujících typů elektrických spínacích přístrojů, ale také na specificky upravené elektrické spínací přístroje přímo vyhovující požadavkům zákazníka. Doposud má za sebou firma více jak 3000 úspěšných elektrotechnických zakázek na míru. Jejich rozsah působnosti sahá do bezmála 60-ti zemí po celém světě. Všechny následující podkapitoly vychází z [3] a [4].

3.1 Historie firmy

Počátek firmy sahá do osmdesátých let devatenáctého století, kdy dva muži, inženýři Eduard Bartelmus a Josef Donát, založili první českou továrnu na elektrické stroje a zařízení v Brně. Roku 1927 se stala součástí Škodových závodů v Plzni. Následovalo osamostatnění v roce 1949, kdy zároveň došlo k přejmenování na Elektrotechnické závody Julia Fučíka, EJV Brno. V roce 1966 z jejich vývojového střediska vznikl Výzkumný ústav elektrických přístrojů a rozváděčů, VUEP. A právě tento ústav je právním předchůdcem firmy IVEP.

3.2 Elektrické přístroje VN z produkce IVEP, a.s.

Firma IVEP, a.s. nabízí výrobu již existujících typů elektrických spínacích přístrojů, které lze dohledat v katalogu. Následné podkapitoly popisují odpojovače, které souvisí se zvoleným tématem bakalářské práce. Podrobnějším popisem všech spínacích přístrojů z produkce IVEP, a.s. se zabývá semestrální práce [10] na kterou tato bakalářská práce navazuje.

Před seznámením se s odpojovači z produkce IVEP, a.s., v následující podkapitole jsou popsány důležité názvy technických údajů.

3.2.1 Technické údaje přístrojů

Technické údaje jsou důležité veličiny, které určují vlastnosti a chování všech přístrojů, a dodavatel je povinen je uvádět na štítku přístroje. Každý parametr je pro každý přístroj specifický. U spousty přístrojů tyto hodnoty určují normy, o kterých bude zmínka později. Základními veličinami jsou:

- 1) Jmenovité napětí určuje hladinu napětí, do kterého přístroj je určen, a ze kterého vychází podmínky pro napěťové zkoušky.
- 2) Jmenovitá frekvence je hodnota frekvence sítě, do které je přístroj určen.
- 3) Jmenovitý proud je hodnota proudu, který přístrojem protéká za normálního stavu.
- 4) Jmenovitý krátkodobý proud je hodnota proudu, který dokáže přístroj po dobu krátkodobého zpoždění bez poškození přenášet. Krátkodobé zpoždění nejčastěji bývá 1 s.

- 5) Jmenovitý dynamický proud je velikost vrcholové hodnoty proudu, kterou dokáže přístroj za zkušebních podmínek vydržet bez poškození.
- 6) Jmenovitý zapínací zkratový proud je vyjadřován jako předpokládaný dynamický proud. Udává zkratovou zapínací schopnost za jmenovitého napětí a jmenovité frekvenci.

3.2.2 Vnitřní odpojovače

Tyto typy odpojovačů se využívají k viditelnému odpojení obvodů v napěťových hladinách od 1 do 123 kV s jmenovitou frekvencí 50 Hz (lze i pro 16 Hz a 60 Hz). Minimální živostnost se pohybuje vždy kolem 40 let.

Jejich šíře provedení jsou jedнопólové, dvojpólové, trojpólové i více pólové na přání zákazníka. Ovládání může být motorové nebo ruční.

Vnitřní odpojovače QAK je označení pro typ odpojovače, kdežto typ QAKZ je označení pro odpojovač kombinovaný s uzemňovačem QZ, kde uzemňovací kontakty mohou být dle požadavku na dolních nebo horních praporcích kontaktů odpojovače. Oba typy se používají ke spínání nezatižených elektrických obvodů ve vn rozvodnách a rozvaděčích, v případě QAKZ také k uzemnění některých jejich částí.

Rozsah provedení jmenovitého napětí od 1 do 123 kV. Rozhraní jmenovitého proudu od 100 A až do 8 kA, kdy rozhraní pro jmenovité zkratové proudy je od 16 do 120 kA a jmenovitý dynamický proud od 40 do až 300 kA.

Vnitřní generátorové odpojovače QAS, jehož základní funkcí je spínání nezatižených elektrických obvodů generátorů umístěných v rozvodnách a rozvaděčích. Jejich specifickou vlastností je vysoká proudová trvalá zatížitelnost a nadstandardní zkratová odolnost. Dokáže přenášet až 190 kA jmenovitého krátkodobého proudu a vydržet až 475 kA jmenovitého dynamického proudu.

Rozsah jmenovitého napětí je menší než u odpojovačů typu QAK, od 12 do 36 kV.

Vnitřní odpojovače QAK HD je pro anglický název HEAVY DUTY. Tyto typy odpojovačů slouží ke spínání nezatižených elektrických VF (rezonanční) nebo DC (stejnoseměrné) obvodů v rozvaděčích a speciálních provozech. Díky jejich vysoké proudové trvalé zatížitelnosti a robustní stavbě se používají i do těch nejhorších provozů. Používají se typicky v chemických provozech a napájení tavicích pecí.

Rozsah jmenovitého napětí mají od 10 V do 12 kV a jmenovitého proudu 8 až 25 kA (modulárně až 160 kA), jmenovitý krátkodobý proud až 160 kA a jmenovitý dynamický proud až 375 kA.

3.2.3 Venkovní odpojovače

Stejně jako ve vnitřních prostorách, tyto spínací přístroje slouží k viditelnému odpojení obvodů v napěťových hladinách v rozsahu od 12 do 52 kV s jmenovitou frekvencí 50 Hz (60 Hz) a rozsah jmenovitý proud 400–3150 A. Pro provoz ve venkovním prostředí jsou u každého přístroje pracovní podmínky, ukázkově znázorněny v **tabulce 3.1**.

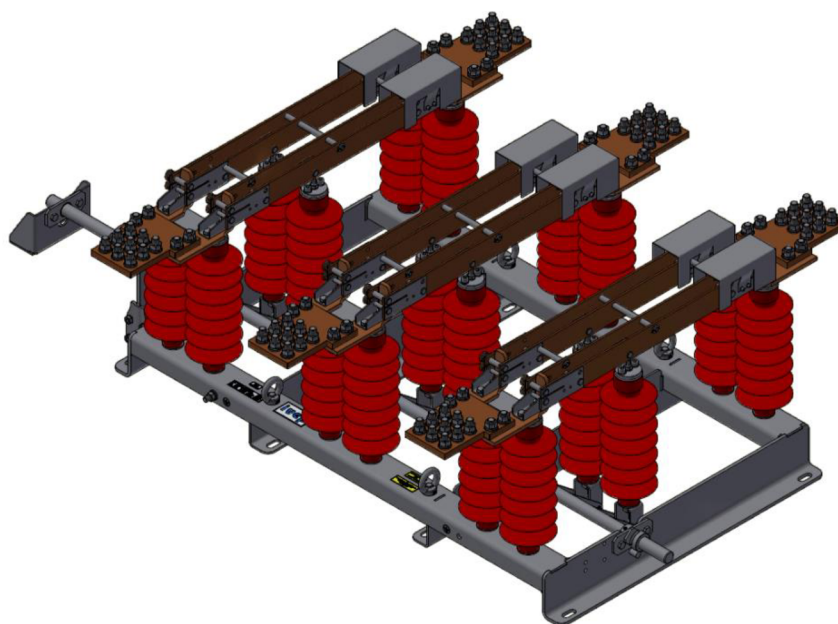
Tabulka 3.1 Pracovní podmínky pro většinu venkovních spínacích přístrojů

Nejvyšší teplota okolí	T_{MAX}	+ 50	°C
Nejnižší teplota okolí	T_0	- 50	°C
Relativní vlhkost vzduchu	Φ	100	%
Tlak větru nepřesáhne	p	700	Pa
Nadmořská výška	(-)	do 1000 <	m
Stupeň oblasti znečištění	(-)	I - IV	(-)

Stupeň oblasti znečištění se určuje podle vlivů na okolní prostředí. Podle stupně oblasti znečištění se podle normy ČSN 33 0405 navrhuje venkovní elektrická izolace.

Venkovní odpojovač KBE je provozně nenáročný spínací přístroj s viditelnou odpojovací dráhou. Tento přístroj lze kombinovat s jinými přístroji, jako je například uzemňovač (KBEZ) nebo kombinace s pojistkovým spodkem (KBE P). Na přání zákazníka je také možnost doplnit odpojovač s omezovači přepětí. Jejich ovládání může být ručními nebo motorovými pohony.

Pro tento typ odpojovače jsou vztaženy veškeré výpočty v následujících kapitolách.



Obrázek 3.1 3D zobrazení nožového venkovního odpojovače typu KBE

4. NORMY ČSN PŘÍSLUŠNÉ K ODPOJOVAČŮM

Nejpodstatnější normy pro odpojovače jsou dvě následující normy, ze kterých budou následující podkapitoly vycházet:

1. ČSN EN 62271-1: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. [5]
2. ČSN EN 62271-102: Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu. [6]

Obsahem norem je detailní popis termínů, definic se seznamem jejich indexů pojatých v normě, normální a zvláštní pracovní podmínky pro vnitřní a venkovní provedení, jmenovité hodnoty, konstrukci a provedení se specifickými požadavky na dané součásti, typové zkoušky, výrobní kusové zkoušky, volba jmenovitých hodnot a parametrů, definice informací v poptávkách, nabídkách a objednávkách, přepravu, skladování a v rámci bezpečnosti opatření v hledisek obsluhy (uživatelů) a výrobců. Norma pro odpojovače část 102 se často odkazuje na část 1.

4.1 Normální a zvláštní pracovní podmínky

Spínací a řídicí zařízení zahrnující i pohony a pomocná zařízení odpojovačů jsou určena pro použití při normálních pracovních podmínkách při jejich jmenovitých hodnotách, není-li určeno jinak.

Tyto normální pracovní podmínky se mírně liší pro venkovní a vnitřní provedení zařízení, kdy venkovní parametry jsou většinou rozšířené o působení vnějších přírodních vlivů a zprísněné podmínky pro oboje použití. Dále se budeme věnovat venkovním podmínkám, které se týkají odpojovačů.

4.1.1 Venkovní provedení spínacích a řídicích zařízení pro normální pracovní podmínky

Teplota okolního vzduchu nesmí klesnout pod $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nepřesáhnout $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Její průměrná hodnota nesmí být větší jak $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 24 hodin. Nadmořská výška, ve které je zařízení instalováno, nepřesáhne 1000 m.

Pro podmínky vlhkosti vzduchu odlišujeme denní a měsíční časový úsek. Během 24 h průměrná relativní vlhkost nepřesáhne 95 % a průměrná hodnota tlaku vodní páry nepřesáhne 2,2 kPa. Během měsíce průměrná relativní vlhkost nepřesáhne 90 % a průměrná hodnota tlaku vodní páry nepřesáhne 1,8 kPa. Na rozdíl od vnitřních podmínek tyto hodnoty mohou být překročeny. Počítá se totiž s deštěm a možnou kondenzací.

Pro venkovní podmínky dále platí, že působení slunečního záření na zařízení nesmí překročit hodnotu hustotu výkonu 1000 W/m^2 , tloušťka námrazy (ledu) nesmí být víc jak 20 mm a rychlost větru nepřesáhne 34 m/s. Vibrace způsobené vnějšími vlivy nepřekročí vliv vibrací samočinností zařízení. Okolní vzduch může být znečištěn prachem, kouřem,

korozivními plyny, parami nebo solí a znečištění nepřekročí stupeň znečištění „střední“ (IEC TS 60721-4).

4.1.2 Venkovní provedení spínacích a řídicích zařízení pro zvláštní pracovní podmínky

Pokud je zařízení používáno v jiných než normálních pracovních podmínkách uvedených v kapitole 4.1.1, musí požadavky uživatele obsahovat údaje a parametry o zvláštních podmínkách.

Pokud je zařízení používáno ve větší nadmořské výšce jak 1000 m, musí být izolační výdržná hladina větší, než je jmenovitá hodnota. Dle normy IEC TS 60815-1 izolaci také ovlivňuje „těžký“ nebo „velmi těžký“ stupeň znečištění.

Rozsah mezi minimální a maximální teplotou okolního vzduchu se může lišit podle typu klimatu, ve kterém je zařízení provozováno. Největší extrémy jsou extrémně studený typ klimatu s rozsahem od -50 °C až 40 °C a velmi horký typ klimatu s rozsahem od -5 °C až 55 °C. Relativní vlhkost po dobu 24 h může dosahovat až 98 %, a to v teplých vlhkých prostorech jako je vnitřní prostor v tropech.

Pokud je poloha instalace zařízení jiná, než na kterou je navrženo, uživatel je povinen ji definovat. Pokud se zařízení nachází v rizikové oblasti s výskytem zemětřesení, uživatel musí specifikovat provozní požadavky a dovolené poškození. Zároveň pokud se zařízení nachází v oblasti s ostatními neobvyklými druhy vibrací, uživatel musí identifikovat místo použití.

4.2 Jmenovité hodnoty

Definice jmenovitých hodnot jsme si již popsali v kapitole 3.2.1. Následující popis jmenovitých hodnot vychází z normy. Tyto veličiny jsou důležité pro správnou volbu přístroje.

Jmenovité napětí U_r je efektivní hodnota sdruženého napětí rovné nejvyšší hodnotě napětí sítě, do které je zařízení navrženo. Dále norma udává normalizované hodnoty jmenovitého napětí ve dvou rozsazích. Rozsah I do 245 kV včetně, který se dále dělí na dvě řady hodnot, a rozsah II nad 245 kV s jednou ustavenou řadou.

Jmenovitá izolační hladina zařízení se volí v tabulkách daných normou z rozsahu a řady v jakých se velikost jmenovitého napětí nachází. Z těchto tabulek jsme následně schopni zvolit následující dvě hodnoty.

Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d je efektivní hodnota napětí, která odpovídá nejvyšší hodnotě průmyslového napětí, které působí po dobu jedné minuty, při níž nesmí dojít k poškození zařízení.

Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu U_p je vrcholovou hodnotou napětí, které nezpůsobí přeskok mezi kontakty.

Další hodnotou je jmenovitý trvalý proud I_r – efektivní hodnota proudu, kterou může zařízení trvale přenášet.

Jmenovitý krátkodobý výdržný proud I_k určuje efektivní hodnotu proudu, kterou může zařízení přenášet v sepnutém stavu po stanovenou jmenovitou dobu trvání zkratu t_k za provozních podmínek, aniž by se přístroj poškodil.

Jmenovitý dynamický výdržný proud I_p určuje vrcholovou hodnotu první výrazné půlvlny jmenovitého zkratového výdržného proudu.

Důležité pro přístroj je taky jmenovité napětí pomocných a řídicích obvodů U_a , kdy je nutné si uvědomit, že každé zařízení může využívat hned několik napětí pomocných obvodů. Tato jmenovitá napětí se volí z normalizovaných napětí.

4.3 Konstrukce a provedení

Tato část normy popisuje požadavky na různé konstrukční části zařízení, do kterých se zahrnují i pomocné a řídicí části, které musí výrobce při výrobě, konstrukci a montáži dodržet nebo je uvést do dokumentace zařízení.

Pokud se v některé části zařízení vyskytuje kapalina nebo plyn, výrobce musí uvést druh, požadované množství a kvalitu daného plnidla. Zároveň součástí zařízení musí být zařízení monitorující tlak plynu, nebo zařízení pro kontrolu hladiny kapaliny. Tyto zařízení zároveň musí kontrolovat minimální a maximální hodnoty určené meze, která zajišťuje správnou účinnost.

Pomocné a řídicí zařízení zajišťují elektronické řízení, dozor včetně ochrany před úrazem elektrickým proudem, monitorování a komunikaci. Vhodná ochrana se ověřuje typovou zkouškou elektrické pevnosti izolace.

Pokud je použito strojní ovládání nebo nezávislé ruční, nesmí být dosaženo bodu uvolnění energie, která souvisí se zapínací a vypínací funkcí, což by mělo splňovat požadavek zabránit nežádoucímu nahodilému sepnutí/rozepnutí. Při pohybech kontaktů během funkce se nesmí zmenšit vypínací dráha pod jmenovitou hodnotu použité izolační hladiny. Pro ručně ovládané ovladače musí být zcela zřejmý směr ovládání. Toto ovládání má normou doporučené zásady, jako je zapínání ve směru otáčení hodinových ručiček, stláčením a pohybem doprava nebo nahoru. Použití jiných principů není zakázáno.

Důležitou součástí je povinnost opatřit příslušné spínací a řídicí zařízení štítkem s povinnými terminologiemi dané normou. Základem je název výrobce, typové označení a výrobní číslo zařízení a důležité jmenovité hodnoty s provozními podmínkami.

4.4 Typové zkoušky

K prověření jmenovitých a charakteristických hodnot spínacích a řídicích zařízení, jejich ovládacích zařízení a pomocných zařízení, jsou zapotřebí typové zkoušky, které musí být prováděny v normalizovaných zkušebnách. Typová zkouška musí probíhat za podmínek požadovaných pro provoz zařízení vybavených pohonem a případně pomocným zařízením.

Zkušebně/laboratoři, kde je zařízení podrobováno typové zkoušce, musí výrobce pro její uskutečnění předložit potřebný seznam výkresů, soubory dat a ostatní údaje pro dané zařízení potřebné k provedení požadované zkoušky. Společně s tím výrobce musí dodat prohlášení, které zaručuje správnou verzi výkresů a souboru dat.

Norma zahrnuje i typové zkoušky, které nejsou předmětem této práce. Z důvodu ponechání vědomí, že jsou v normě obsaženy, jsou v následující kapitole stručně popsány.

4.4.1 Druhy typových zkoušek

Zkoušky elektrické pevnosti izolace se provádějí podle normy IEC 60060-1:2010, pokud v používané normě není stanoveno jinak. Izolace se zkouší za různých podmínek podle toho, do jakého prostředí je zařízení určeno. Pro venkovní použití, týkající se odpojovačů, to jsou například zkoušky za deště, zkoušky atmosférickým impulsem a zkoušky při umělém znečištění. Zároveň se provádí zkoušky střídavým napětím průmyslového kmitočtu a zkoušky spínacími impulsy, kdy izolace mezi póly je zkoušená pouze za sucha podle tabulek daných normou.

Zkouška rádiového rušení (*RIV – Radio Interference Viva*) týkající se čistě spínacích a řídicích zařízení konstruovaných na jmenovité napětí 245 kV a výše. Pro nižší meze napětí podle zkušeností z provozů je tento vliv rušení zanedbatelný.

Mezi typové zkoušky patří také měření rezistance, která se dělí podle třídy pomocných kontaktů. Čím vyšší třída, tím přísnější jsou požadavky:

- Vzorky typu kontaktu třídy 1 a 2 se zkouší pod proudem o velikosti 10 ± 2 mA pod stejnosměrným napětím naprázdno 6 V s tolerancí 0 do -15 %. Rezistance na sepnutých kontaktech nesmí překročit 50 Ω .
- Vzorek typu kontaktu třídy 3 je zkoušen pod proudem menším než 10 mA pod stejnosměrným napětím naprázdno menším než 30 mV. Rezistance na sepnutých kontaktech nesmí překročit pouhý 1 Ω .

Zkoušky trvalým proudem se provádí na zkoušeném zařízení ve stavu, kdy jsou čisté kontakty a pokud je to možné, tak naplněné vhodnou kapalinou nebo plynem při nejmenším provozním tlaku (přetlak) pro izolaci. Parametry pro zkoušku se liší pro hlavní a pomocné obvody zařízení. Důležitým prvkem zkoušky je měření teploty v průběhu zkoušky, a to monitorování teploty okolního vzduchu a zkoušeného zařízení. Kritériem pro úspěšné vyhodnocení zkoušky jsou mezní hodnoty předepsané v tabulkách daných normou.

Zkoušky pro ověření stupně ochrany krytem se provádějí na kompletních krytech zařízení už připraveného k provozu. Tato zkouška je prováděna pouze tehdy, pokud vzniknou pochybnosti o správnosti požadavků kladených na kryty, a to ve všech polohách daných částí zařízení.

Zkouška těsnosti je prováděna se stejným plnivem (kapalina nebo plyn), které bude použito v provozu, při teplotě okolí pohybující se v mezi od 15 °C do 30 °C. Každé

zařízení má dovolenou hodnotu úniku, která nesmí být při zkoušce překročena. Velikost těchto hodnot určují normalizované tabulky pro příslušné médium.

Zkoušky elektromagnetické kompatibility (*EMC – Electro-Magnetic Compatibility*) se dělí na zkoušky vyzařování, zkoušky odolnosti pomocných a řídicích obvodů a jejich dodatečné zkoušky EMC. U pomocných a řídicích obvodů mají EMC požadavky a zkoušky v této normě přednost před ostatními specifikacemi EMC.

Norma dále obsahuje doplňující zkoušky pomocných a řídicích obvodů týkající se především technických (jmenovitých) parametrů vysokonapěťových zařízení, a zkoušky rentgenového záření pro vakuová zhašedla.

4.5 Typové zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Podle této typové zkoušky budou probíhat následující výpočty, proto bude v této kapitole popsána podrobněji než doposud zmíněné typové zkoušky.

Části zařízení, jako je hlavní obvod a obvody, kde přichází v úvahu vliv mechanických a dynamických účinků proudu, jako jsou například uzemňovací obvody, se podrobují zkouškám pro ověření jejich schopnosti odolat vlivu krátkodobého a dynamického výdržného proudu.

Tato zkouška není limitována teplotou okolí a provádí se při jmenovitém kmitočtu s tolerancí $\pm 10\%$ při kterékoli vhodné napěťové mezi.

4.5.1 Uspořádání zkušební obvodu a zařízení

Pro korektní ověření správných mechanických a tepelných účinků proudu je zapotřebí správná montáž zkoušeného zařízení s pohonem na vlastní rám(y). Zkouška probíhá při zapnuté poloze zařízení.

Pokud je součástí zařízení mechanický spínací přístroj, musí se před samotnou zkouškou provést jeden spínací cyklus naprázdno pro změření elektrického odporu hlavního obvodu. Vypínání naprázdno u strojně ovládaných přístrojů se provádí při jmenovitém napájecím napětí a ručně ovládaných přístrojů se měří krouťací moment (síla).

Zkoušky se provádí jako jednofázové nebo třífázové. V případě jednofázové zkoušky u zařízení s oddělenými póly lze zkoušku provádět na dvou sousedních pólech, nebo na jednom se zpětným vodičem.

Výrobce je povinen v technické dokumentaci k danému přístroji stanovit vzdálenosti mezi svorkami a podpěrkami vodičů, které jsou ke svorkám nejbližší z obou stran.

4.5.2 Průběh zkoušky

Podmínkou pro zkušební proud je, že se jeho střídavá složka musí rovnat střídavé složce krátkodobého výdržného proudu I_k . Pokud se tyto hodnoty liší, jejich dovolená tolerance je dána normou. Vrcholová hodnota proudu nesmí bez souhlasu výrobce

klesnout nad hodnotu 5 % dynamického výdržného proudu I_p . U trojfázové zkoušky se střídavá složka nesmí lišit o více jak 10 % od průměrné hodnoty proudů ve všech fázích.

V první použitelné metodě musí být přiložen zkušební proud po dobu, která se musí rovnat jmenovité době zkratu t_k , s povolenou tolerancí $+5\%$.

U další možné metody hodnota střídavé složky Jouleova integrálu $\int I^2 dt$ nesmí být menší než hodnota násobku zkratového proudu I_k na druhou a doby zkratu t_k .

Norma dovoluje odchylky, jako je klesnutí pod předepsané hodnoty během zkoušky za určitých parametrů a podmínky, oddělit zkoušku krátkodobým výdržným proudem od zkoušky dynamickým výdržným proudem, zkrátit dobu trvání zkoušky zvýší-li se efektivní hodnota proudu, nebo pokles kmitočtu proudu na 80 % předepsané tolerance, pokud charakteristiky zkušební laboratoře nedovolí udržovat kmitočet zkušebního proudu v rámci předepsaných tolerancí a podmínek.

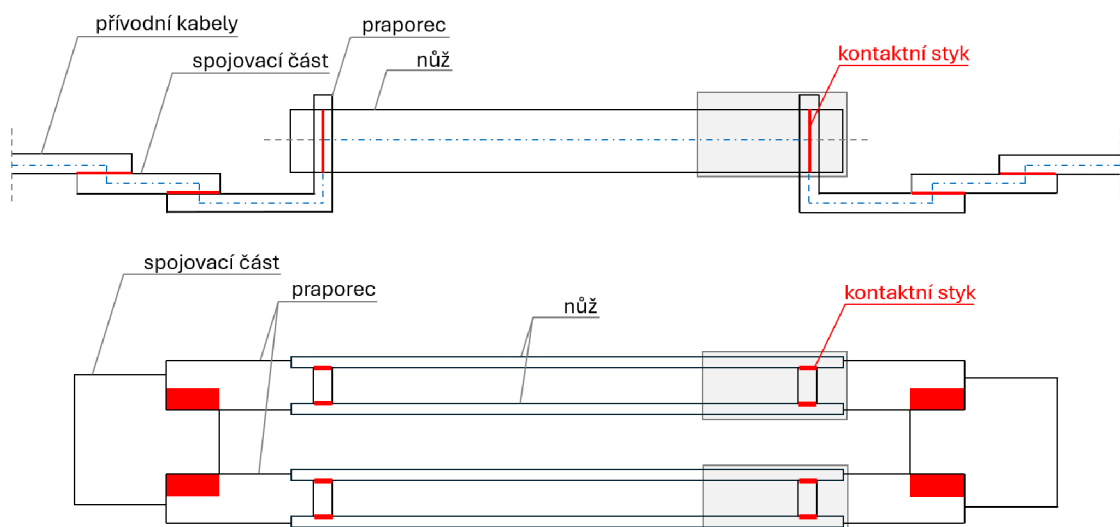
5. VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH ÚČINKŮ ODPOJOVAČE KBE

Tato část je věnována výpočtům elektrodynamických a tepelných účinků krátkodobého oteplení způsobené zkratovým proudem o velikosti 57 kA na nožový odpojovač typu KBE 3D 36.3150.57/3.L.R.-.-500/3 (viz. **obrázek 3.1**), jmenovitá hladina 38,5 kV a jmenovitý proud 3150 A. Zvolené postupy výpočtu budou provedeny podle knihy Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů. [9]

Výpočty budou využívat znalostí, které byly sepsány v teoretických částech práce. Půjde o výpočet silových účinků na vodiče v důsledku interakce magnetických polí těchto vodičů a výpočet tepelných účinků zkratového proudu na vodiče v další části.

5.1 Části odpojovače

Z hlediska působení elektrodynamických sil na konstrukci odpojovače je důležité rozložit proudovodnou dráhu na jednotlivé úseky, a to na rovnoběžné úseky, záhyby a kontaktní styky. Důvodem je odlišná velikost sil v každém z těchto úseků.



Obrázek 5.1 Proudovodná dráha jedné fáze odpojovače KBE

5.1.1 Rovnoběžné úseky

Rovnoběžné úseky se u spínacích přístrojů vyskytují relativně často, většinou z důvodu žádoucího rozdělení proudů do dvou nebo více větví, kdy elektrodynamické účinky jsou úměrné druhé mocnině proudu, a dochází k znatelnému zmenšení silového působení na vodiče.

Každá fáze daného odpojovače typu KBE se skládá ze dvou párů nožů. U výpočtů silového působení v těchto částech se musí brát v úvahu rozložení proudů. V jednom páru

nožů činil procentuální proudový rozdíl $\pm 5 \%$. To by činilo na vnitřní nůž páru 47,5 % velikosti poloviny proudu a pro vnější nůž páru 52,5 %. Při přepočtu na procentuální rozložení celkového proudu, rozdíl mezi noži jednoho páru činí 2,5 %. Tato hodnota je tak malá, že výpočty ovlivňuje minimálně, a proto se při následujících výpočtech bude uvažovat rovnoměrné rozložení proudu v celé proudovodné dráze jedné fáze.

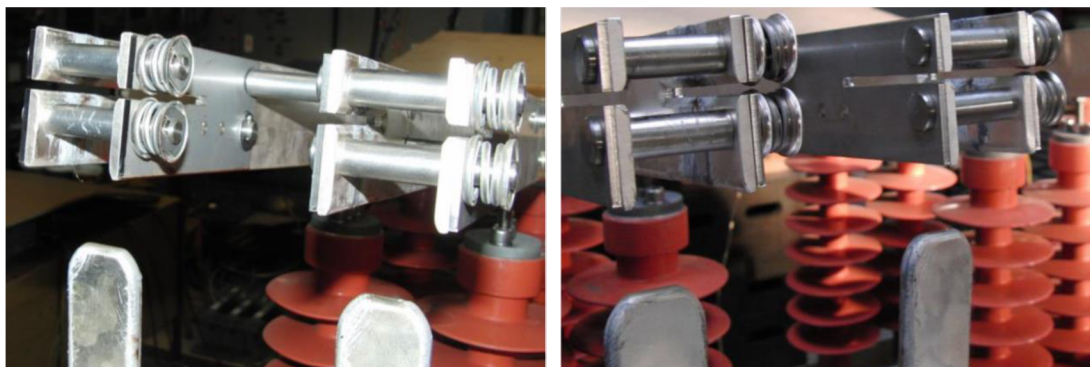
5.1.2 Pravoúhlé záhyby

Na obou koncích pólů odpojovače se u každého páru nožů nachází totožné spojovací dílce, které se budou označovat jako přívodní a vývodní praporce. Tyto praporce tvoří pravoúhlý záhyb ve tvaru písmene „L“, kdy ramena svírají úhel 90° .

Každý z praporců je opatřen čtyřmi otvory pro šroubové spoje o dvou různých průměrech. Dva otvory s větším průměrem na koncové spodní části jsou určeny pro připevnění ke spojovací měděné destičce, na kterou jsou přivedeny kabely. Pár otvorů s menším průměrem jsou blíže k pravoúhlému záhybu a slouží k upevnění na izolátory typu FAVEO.

5.1.3 Kontaktní styky

Kontakty jsou nejkritičtější místa proudovodné dráhy z hlediska dimenzování a návrhu konstrukce přístroje. Ve spínacích přístrojích se dělí na pevné a pohyblivé. V případě, pro který jsou výpočty prováděny, se u daného typu odpojovače pevný kontakt pohyblivých nožů nachází na přívodním praporci a pohyblivý kontakt, který je chráněn proti vnějším vlivům stříškou, která se nachází na vývodním praporci.



Obrázek 5.2 Kontaktní místo odpojovače typu KBE před zkratovou zkouškou

5.1.4 Izolátory

Funkcí izolátorů je oddělení neživých vodivých částí konstrukce od proudovodné dráhy rozvaděče nebo spínacího přístroje. Jejich účelem je mechanické uchycení proudovodné dráhy přístroje a zamezení přeskočení náboje na neživé uzemněné části.

Pro venkovní izolátory je potřeba dobrá odolnost proti atmosférickým podmínkám, chemická a tepelná odolnost. Tyto vlastnosti splňují anorganické pevné materiály, jako je například technická keramika, porcelán nebo slída. Během výroby se venkovní

izolátory ponořují do glazurové lázně a vzniklý povrch sklovitého charakteru je necitlivý vůči chemickým defektům a zároveň dodává odolnost proti silnému větru.

Pokud vznikne přeskok náboje na izolátor dochází pokaždé k poškození glazury a povrch se stává čím dál tím hrubším. Tyto nedokonalosti v povrchu jsou náchylnější na vnější atmosférické vlivy a nečistoty.

5.2 Síly působící na nůž

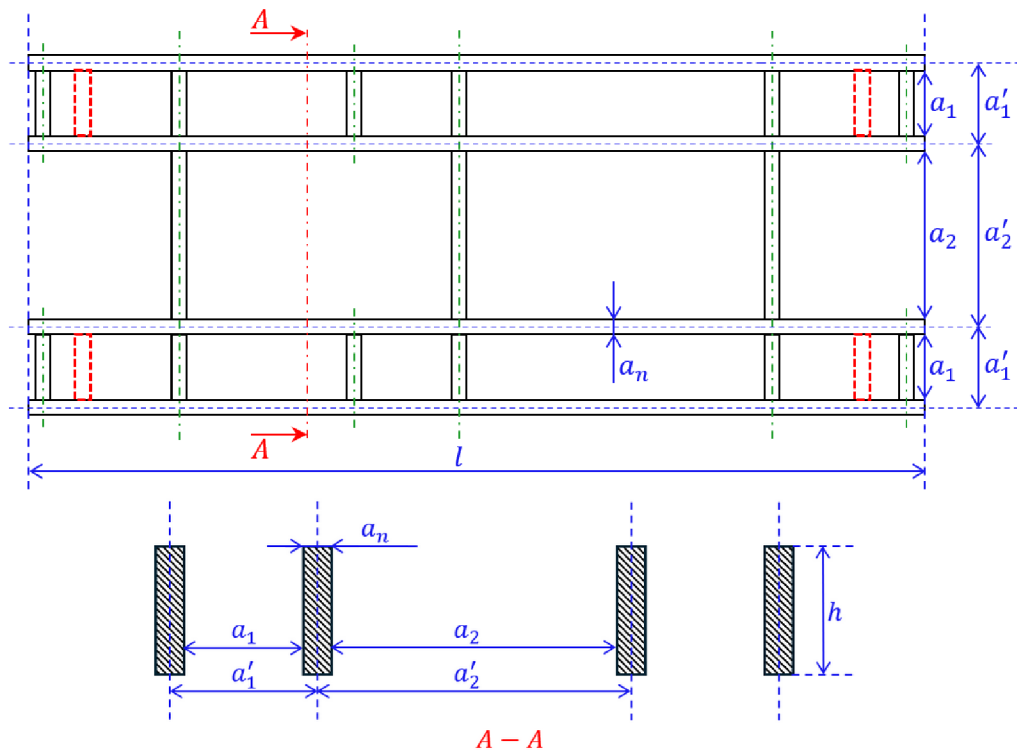
Nože odpojovače KBE vykonávají samotný dynamický pohyb při připojování nebo odpojování obvodu. Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.1.1, proudovodná dráha jedné fáze se skládá ze dvou párů nožů. Vzniká tedy více silových působení mezi paralelními vodiči, a to mezi dvěma noži v páru, mezi páry nožů jedné fáze, a následně i silové působení mezi fázemi, které by však mělo být v důsledku izolačních vzdáleností minimální.

Při uvažování nekonečné délky vodičů a nekonečně tenkého průřezu, vztah pro výpočet síly vypadá následovně:

$$F_1 = 10^{-7} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{2l_1}{a}, \quad (5.1)$$

kde i_1 a i_2 jsou proudy obou paralelních vodičů, rozměr l_1 je délka vodiče, pro který se počítá daná síla F_1 , a rozměr a je délka mezi středovými osy daných vodičů.

Ve skutečnosti vodiče mají konečné délky a jejich průřezy nejsou tenké ani kruhového tvaru. Tyto skutečnosti respektují korekční činitele.



Obrázek 5.3 Soustava nožů jedné fáze

Tabulka 5.1 Hodnoty rozměrů zakótovaných na **obrázku 5.3**

a_n [mm]	a_l [mm]	a_l' [mm]	a_2 [mm]	a_2' [mm]	l [mm]	h [mm]
5	38	43	82	87	725	60

5.2.1 Činitel uspořádání vodičů konečné délky

Činitel uspořádání vodičů konečné délky se značí k_d a vyjadřuje, jak se změní velikost působící síly v případě dvou vodičů omezené délky. Výpočet se částečně mění podle konfigurace daných vodičů. Více je popsáno v **kapitole 2.3.2**.

V případě výpočtu silového působení na rovnoběžné úseky daného odpojovače jsou vodiči nože, které mají stejnou délku. Pro tuto soustavu vodičů platí pro činitel vztah:

$$k_d = \sqrt{\left(\frac{a}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l}, \quad (5.2)$$

Tento vztah se použije pro výpočty daných činitelů uspořádání pro dva paralelní nože jednoho páru (**vztah (5.3)**) a mezi vnitřními noži párů jedné fáze (**vztah (5.4)**):

$$k_{d1} = \sqrt{\left(\frac{a_1'}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a_1'}{l} = \sqrt{\left(\frac{43}{725}\right)^2 + 1} - \frac{43}{725} = 0,94245; \quad (5.3)$$

$$k_{d2} = \sqrt{\left(\frac{a_2'}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a_2'}{l} = \sqrt{\left(\frac{87}{725}\right)^2 + 1} - \frac{87}{725} = 0,88171; \quad (5.4)$$

Kde rozměry a_1' a a_2' jsou vzdálenosti středových os vodičů, vzdálenost l je délka nože. Všechny rozměry jsou znázorněny na **obrázku 5.3** a hodnoty jsou použity z **tabulky 5.1**.

5.2.2 Činitel tvaru průřezu

Činitel tvaru průřezu se značí k_p a je závislý na uspořádání a rozměrech soustavy vodičů. Použity budou hodnoty z **tabulky 5.1** a rozměry jsou zakótovány v **obrázku 5.3**. Dle **kapitoly 2.3.2**, kdy se výpočet určuje podle poměru šířky a výšky vodiče, platí podmínka;

$$\frac{b}{h} = \frac{a_n}{h} = \frac{5}{60} = 0,08\bar{3} \leq 1, \quad (5.5)$$

kde rozměr h je výška nože. Podle podmínky se bude dosazovat do **vztahu (2.2)**. Tento vztah se použije pro výpočty daných činitelů uspořádání pro dva paralelní nože jednoho páru (**vztah (5.6)**) a mezi vnitřními noži párů jedné fáze (**vztah (5.7)**):

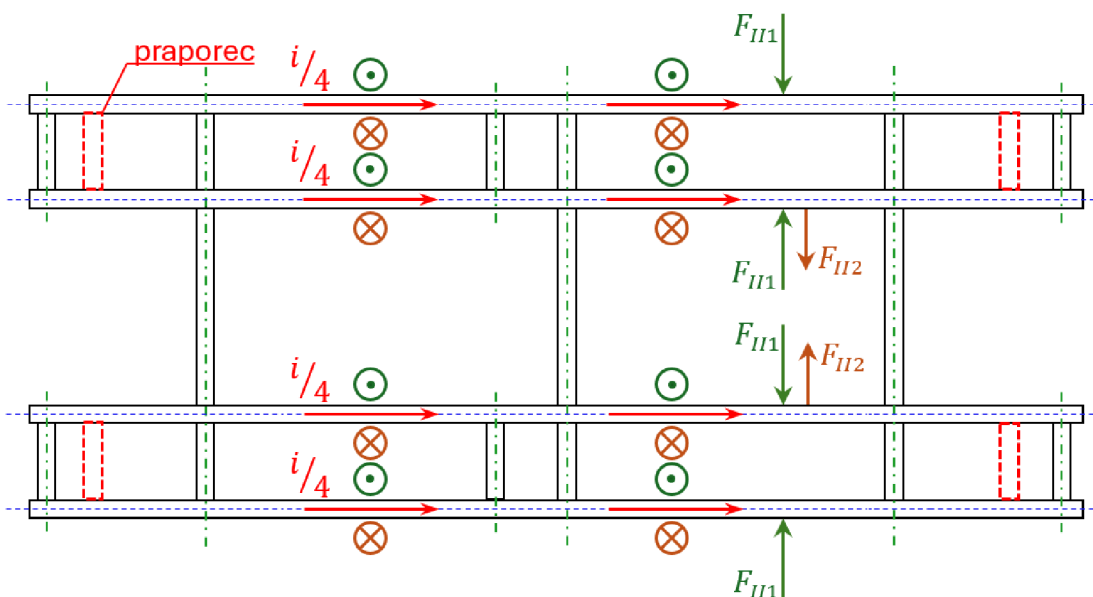
$$k_{p1} = 1 - \frac{0,12}{\frac{a_1' - a_n}{h + a_n} + \frac{a_n}{h}} = 1 - \frac{0,12}{\frac{43 - 5}{60 + 5} + \frac{5}{60}} = 0,82035; \quad (5.6)$$

$$k_{p1} = 1 - \frac{0,12}{\frac{a'_2 - a_n}{h + a_n} + \frac{a_n}{h}} = 1 - \frac{0,12}{\frac{87 - 5}{60 + 5} + \frac{5}{60}} = 0,91077; \quad (5.7)$$

5.2.3 Výpočet silových účinků na nůž

Vzniklé silové působení na nože se určí pomocí magnetického pole, které vzniká kolem každého vodiče, kterým protéká proud. Orientace magnetických indukčních čar se určuje pomocí pravidla pravé ruky. Pro jednu fázi daného odpojovače jsou orientace magnetických indukcí nožů znázorněna na **obrázku 5.4**.

Rozdílné orientace vektorů magnetické indukce znamenají, že nože jednoho páru se budou přitahovat (na **obrázku 5.4** znázorněna jako síla F_{II1}), zatímco na vnitřní nůž každého z párů bude působit přitažlivá síla k vnitřnímu noži druhého páru (na **obrázku 5.4** znázorněna jako síla F_{II2}).



Obrázek 5.4 Určení orientace magnetických indukčních čar podle pravidla pravé ruky pro soustavu nožů jedné fáze

Pro výpočet těchto sil je použit **vztah (5.1)** s respektováním konečných délek a reálných průřezů. Zároveň se uvažuje rovnoměrné rozložení proudů do všech nožů, tudíž platí $i_1 = i_2$. Po úpravě vztah vypadá následovně:

$$F_1 = 10^{-7} \cdot \left(\frac{i_d}{4}\right)^2 \cdot \frac{l}{a} \cdot k_{d1} \cdot k_{p1}, \quad (5.8)$$

kde a je šířka nože, l je délka nožů a i_d je dynamický proud, podle normy v **kapitole 4.5**; $i_d = 2,5 \cdot I_k = 2,5 \cdot 57000 = 142,5 \text{ kA}$.

Kontaktní styk mezi praporcem a nožem není na konci samotného nože. Tento fakt je zohledněn použitím délky mezi středovými osami praporce namísto celé délky nože.

Přitažlivá síla mezi párem nožů F_{II1} :

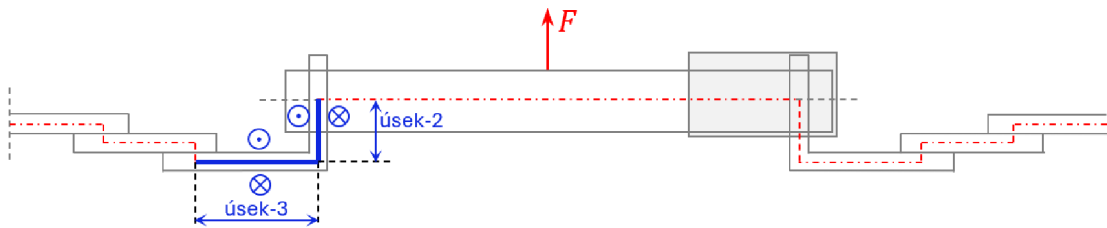
$$F_{II1} = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142500}{4}\right)^2 \cdot \frac{(725 - 60)}{43} \cdot 0,94245 \cdot 0,82035 = 1517,47 \text{ N} \quad (5.9)$$

Přitažlivá síla mezi páry nožů F_{II2} :

$$F_{II2} = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142500}{4}\right)^2 \cdot \frac{(725 - 60)}{87} \cdot 0,88171 \cdot 0,91077 = 779,02 \text{ N} \quad (5.10)$$

Vypočtená hodnota $F_{II1} = 1517,47 \text{ N}$ má směr přitažlivé síly mezi noži jednoho páru a $F_{II2} = 779,02 \text{ N}$ má směr přitažlivé síly mezi jednotlivými páry. Způsobuje to tedy nežádoucí deformaci na nože, kdy nejvíce namáhané jsou vnitřní nože obou párů. Z toho důvodu jsou mezi jednotlivými noži distanční nerezové rozpěrky. Tato síla má zároveň žádoucí účinek přitlaku na kontaktní styk s praporcem.

5.3 Síly působící na L-záhyb



Obrázek 5.5 Úseky 2 a 3 proudovodné dráhy odpojovače KBE

Síly v pravoúhlém záhybu mají narozdíl od rovnoběžných úseků logaritmický průběh. Na **obrázku 5.6** je znázorněna orientace magnetických indukčních čar podle pravidla pravé ruky pro jednotlivé přívodní a vývodní praporce. Podle magnetických indukčních čar lze určit místo, kde budou silové účinky nejintenzivnější, a to u průsečíku os obou ramen, kde vzniká odpudivá síla důsledkem dvou polí se stejnou orientací indukčních čar. Následně velikost působících sil klesá exponenciálně podél os směrem k pólům praporce, (viz **obrázek 5.7**).

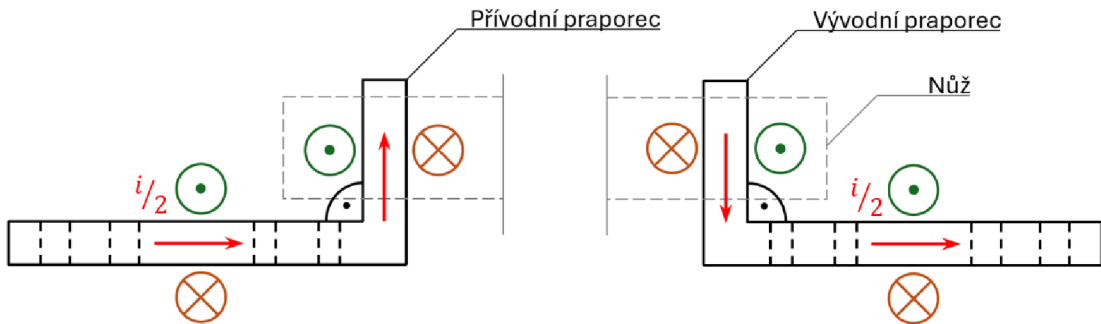
Proud teče jedním směrem a na záhyb tedy budou působit odpudivé síly, a tedy působit ve směru napřimování záhybu a snažit se zvětšit pravoúhlý úhel ramene. Síla působící na svislé rameno praporce o délce h bude jinak velká, než síla působící na vodorovné rameno o délce l . Tato skutečnost vzniká rozdílnou délkou ramen.

Pro výpočet síly F_l , která působí na vodorovné rameno o délce l souvisle, nikoliv rovnoměrně, je použit vztah:

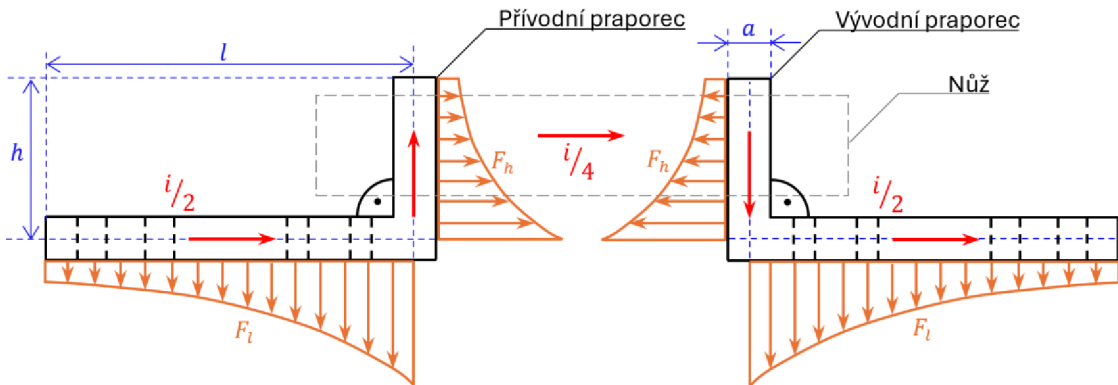
$$F_l = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \left(\frac{l}{r} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + r^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right). \quad (5.11)$$

Pro výpočet síly F_h působící na svislé rameno o délce h je použit vztah:

$$F_h = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \ln \left(\frac{h}{r} \cdot \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{l + \sqrt{l^2 + h^2}} \right). \quad (5.12)$$



Obrázek 5.6 Určení orientace magnetických indukčních čar podle pravidla pravé ruky pro přivodní a vývodní praporec jedné fáze



Obrázek 5.7 Rozložení sil na pravoúhlý záhyb přivodního a vývodního praporce jedné fáze

5.3.1 Dosazení hodnot

Tabulka 5.2 Rozměry jednoho praporce

I_k [kA]	h [mm]	$\frac{1}{2} h$ [mm]	l [mm]	l_{40} [mm]	a [mm]	r [mm]
142,5	89	44,5	183	143	10	5

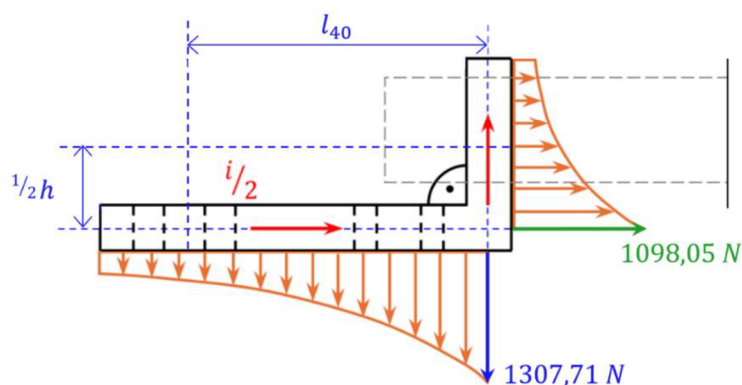
Při výpočtech jsou zohledněny kontaktní styky na obou koncích vodorovného i svislého ramene praporce. Na konci svislého ramene je z obou stran praporce kontaktní styk praporce s noži jednoho páru, proto je délka h uvažovaná při výpočtech poloviční. Na konci vodorovného ramene je kontaktní styk s měděnou destičkou, proto je délka l uvažovaná při výpočtech o 40 mm kratší.

V **tabulce 5.2** jsou konkrétní hodnoty použity pro výpočty sil a jejich rozměry jsou zakótovány na **obrázku 5.7** a **5.8**. Hodnoty jsou dosazeny do **rovnici (5.11)** a **(5.12)**;

$$F_l = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{143}{5} \cdot \frac{44,5 + \sqrt{44,5^2 + 5^2}}{44,5 + \sqrt{44,5^2 + 143^2}} \right) = 1307,71 \text{ N} \quad (5.13)$$

$$F_h = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{44,5}{5} \cdot \frac{143 + \sqrt{143^2 + 5^2}}{143 + \sqrt{143^2 + 44,5^2}} \right) = 1098,05 \text{ N} \quad (5.14)$$

Vypočtené síly F_l a F_h jsou znázorněny na **obrázku 5.8** a platí pro přívodní i vývodní praporce. Vypočtené hodnoty jsou maximální hodnoty působících sil. Síla F_l působí jako deformace na izolátor, zatímco síla F_h působí jako deformace na pár nožů.



Obrázek 5.8 Rozložení vypočtených sil na pravouhý záhyb praporce

5.3.2 Účinky na izolátor

Pod vodorovným ramenem praporce se nachází na každý praporec jeden izolátor, který je namáhán větší silou, než se nachází na konci pólů praporce. Izolátor musí mít dostatečnou mechanickou pevnost, která musí při zkratu dokázat odolat maximální velikosti síly $F_l = 1307,71 \text{ N}$.

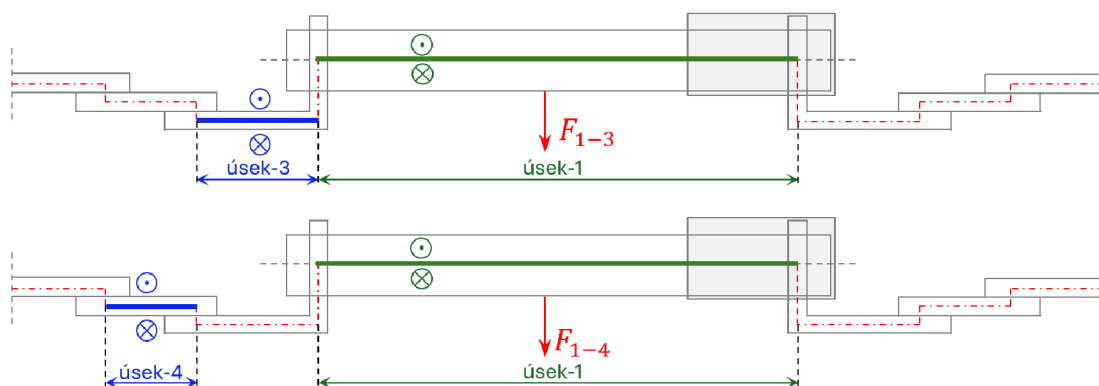
U daného odpojovače jsou použity venkovní podpěrné izolátory typu CBSZ2-24-00, které má firma IVEP též v katalogu. Předností těchto izolátorů je nízká hmotnost, výborná elektrická pevnost a extrémní mechanická spolehlivost. Jsou určeny na venkovní použití v elektrických rozvaděcích a přístrojích střídavého proudu pro napětí do 25 kV.

Tabulka 5.3 Důležité katalogové parametry izolátoru CBSZ2-24-00

Pevnost v tahu	25 kN
Provozní tahová zátěž	12,5 kN
Pevnost v ohybu	4 kN
Hmotnost	1,65 kg
Mechanické upevnění	závit M16

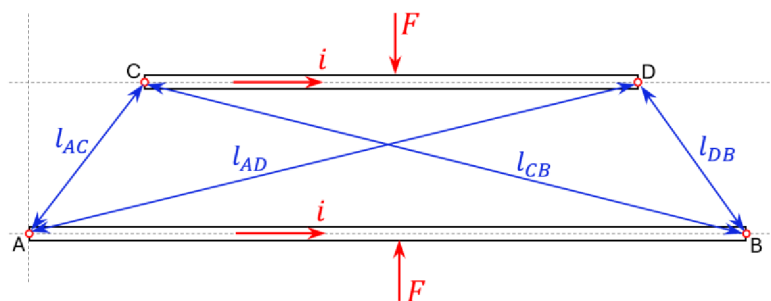
Pokud uvažujeme správnou montáž izolátorů, podle katalogových údajů daný izolátor bez problémů odolá vypočtené maximální síle.

5.4 Dva rovnoběžné nesouběžné jinak dlouhé vodiče



Obrázek 5.9 Úseky 1, 3 a 4 proudovodné dráhy odpojovače KBE

Na nože odpojovače nepůsobí jenom síly vzniklé mezi rovnoběžnými noži a síly vzniklé pravouhlým záhybem. Proudovodná dráha má dva úseky rovnoběžných nesouběžných jinak dlouhých vodičů, jejichž vzniklé magnetické pole také působí na soustavu nožů. Tyto úseky jsou vyznačeny na **obrázku 5.9**.



Obrázek 5.10 Uspořádání dvou rovnoběžných nesouběžných vodičů jiné délky

Silové působení mezi rovnoběžnými nesouběžnými vodiči jiné ale konečné délky dle **obrázku 5.10** se počítá podle vzorce:

$$F = 10^{-7} \cdot i^2 \cdot \frac{\sum l}{a} = 10^{-7} \cdot \frac{i_1 i_2}{a} \cdot (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) \cdot k_p; \quad (5.15)$$

kde délky l_{AD} , l_{BD} , l_{AC} a l_{BC} jsou vzdálenosti mezi koncovými body středových os vodičů, rozměr a je vzdálenost mezi vodiči a k_p je opravný činitel povrchového zhuštění proudu (více kapitola 2.4.2).

Vztahy pro činitele k_h a k_b podle [9]:

$$k_h = \frac{a^2}{h^2} \left[\frac{2h}{a} \operatorname{arctg} \frac{h}{a} - \ln \left(1 + \frac{h^2}{a^2} \right) \right]; \quad (5.16)$$

$$k_b = \frac{a}{b} \left[\left(\frac{a}{b} + 1 \right) \ln \left(\frac{a}{b} + 1 \right) + \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \ln \left(\frac{a}{b} - 1 \right) - 2 \frac{a}{b} \ln \frac{a}{b} \right]. \quad (5.17)$$

Tabulka 5.4 Rozměry úhlopříček mezi úseky naznačených v obrázku 5.9

	l_{AD} [mm]	l_{BD} [mm]	l_{AC} [mm]	l_{BC} [mm]	k_b [-]	k_h [-]
úsek 1-3	809,3	666,5	149,9	45	1,00207	0,81626
úsek 1-4	911,1	768,2	247,6	146,5	1,00411	0,72408
Úsek 3-4	13	143,6	103,3	245,8	-	-

V tabulce 5.4 jsou uvedeny všechny potřebné hodnoty rozměrů a činitelů pro výpočet působících sil podle vzorce (5.15). Přesné výpočty těchto veličin nejsou uvedeny z důvodu použití rozměrů důležitých pro konstrukci odpojovače.

Pro silové působení mezi úseky 1 a 3 platí:

$$l_{1-3} = (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) = 809,3 - 666,5 - 149,9 + 45 = 37,5 \text{ mm}; \quad (5.18)$$

$$F_{1-3} = 10^{-7} \cdot \frac{142500^2}{45} \cdot 37,5 \cdot 1,00207 \cdot 0,81626 = 173,02 \text{ N}; \quad (5.19)$$

Pro silové působení mezi úseky 1 a 4 platí:

$$l_{1-4} = (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) = 911,1 - 768,2 - 247,6 + 146,5 = 41,8 \text{ mm}; \quad (5.20)$$

$$F_{1-4} = 10^{-7} \cdot \frac{142500^2}{32} \cdot 41,8 \cdot 1,00411 \cdot 0,72408 = 482,13 \text{ N}; \quad (5.21)$$

Vypočtené síly F_{1-3} a F_{1-4} jsou maximální hodnoty síly, které nepůsobí rovnoběžně ani na jeden z vodičů. Síla F_{1-4} má na nože a hlavní kontaktní styk větší silové působení

než síla F_{1-3} , ačkoliv polohově se *úsek 4* nachází dál od hlavního kontaktu, než *úsek 3*. To je způsobeno závislostí na protékajících proudů daných úseků, kdy *úsek 3* je vodorovná část praporce, kterým protéká polovina zkratového proudu, zatímco *úsekem 4* protéká plná hodnota.

Nejintenzivnější silové působení se nachází na bližších koncích vodičů, tedy působí ve směru narovnání praporce, a zvyšuje tak silové působení na izolátory, než je určeno v **kapitole 5.3.2**. Celková maximální síla F_{lmax} působící na vodorovné rameno praporce, a tedy působící na izolátor, je součet sil F_l , F_{1-3} a F_{1-4} :

$$F_{lmax} = F_l + F_{1-3} + F_{1-4} = 1307,71 + 173,2 + 482,13 = 1963,04 \text{ N}; \quad (5.22)$$

Podle **tabulky 5.3** izolátor mechanicky odolá i síle $F_{lmax} = 1963,04 \text{ N}$.

Pro silové působení mezi *úseky 3* a *4* platí:

$$l_{3-4} = (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) = 13 - 143,6 - 103,3 + 245,8 = 11,9 \text{ mm}; \quad (5.23)$$

$$F_{3-4} = 10^{-7} \cdot \frac{142500^2}{13} \cdot 11,9 = 464,7 \text{ N}; \quad (5.24)$$

Vypočtená síla F_{3-4} je přitažlivého charakteru mezi praporci a spojovací destičkou. Vypočtená velikost 464,7 N je maximální velikost, která se nachází na jejich kontaktní stykové ploše.

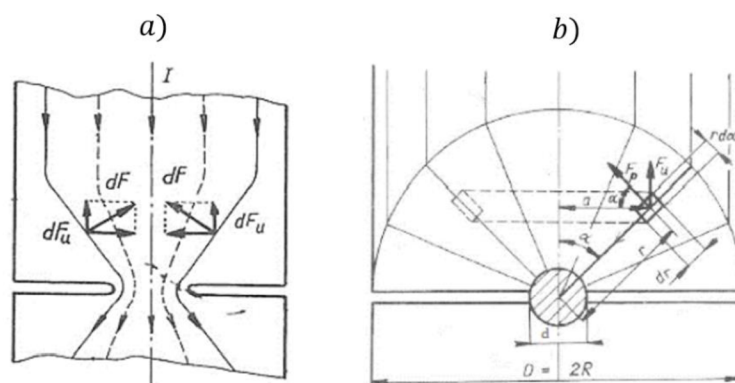
5.5 Výpočet kontaktních styků

Průchod proudu v idealizovaném válcovém průřezu lze rozložit na velké množství rovnoběžných elementárních proudových vláken. Silové působení závisí na poměru dvou rozdílně velkých průřezů:

$$F = i^2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot 10^{-7}, \quad (5.25)$$

kde d_1 a d_2 je počáteční a konečná velikost průřezu.

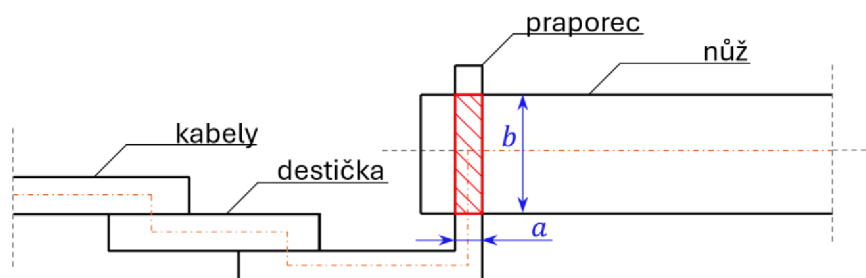
Kontaktní styk se v obvodu chová jako přechodový odpor. Povrchy materiálů nejsou mikroskopicky rovné a vodiče se dotýkají jen v určitých místech. Touto deformací proudovodné dráhy vzniká rozdělení proudových vláken mezi jednotlivé mikroskopické styky, které nazýváme proudovými úžinami [**obrázek 5.11-a**].



Obrázek 5.11 Odpudivé síly v proudové úžině (a) a idealizované proudové úžině (b) [9]

Ve chvíli, kdy se kontakty dostanou do sepnutého stavu, začne na ně působit přítlačná síla F_p , která má zásadní vliv na kvalitu kontaktního styku. Síla F_u vzniklá průchodem proudu v proudových úžinách má odpudivý charakter a působí proti směru síly F_p . Pokud nastane poměr $F_u > F_p$ dojde k odskoku kontaktů a vznikne elektrický oblouk.

5.5.1 Kontaktní styk praporec-nůž



Obrázek 5.12 Kontaktní styková plocha mezi praporem a nožem

Tento kontaktní styk se nachází mezi úseky 1 a 2 a v proudovodné dráze jedné fáze je čtyřikrát. Pro výpočet se používá předpoklad, kdy jsou všechny proudnice soustředěny do jediné proudové úžiny [obrázek 5.11-b].

$$F_u = i^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7}, \quad (5.26)$$

Dalším předpokladem je kulová styková plocha proudové úžiny o průměru d , která nahrazuje reálný styk:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{p1}}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 270}{\pi \cdot 550 \cdot 10^6}} = 1,118 \text{ mm}, \quad (5.27)$$

kde F_p je kontaktní přitlačná síla a H je tvrdost materiálu kontaktu. U daného odpojovače přitlačnou sílu zajišťují dvě pružiny, jejichž síly se pohybují mezi hodnotami 180-360 N. Pro výpočet byla použita střední hodnota 270 N. Tvrdost mědi je 550 MPa.

Rozměr D je průměr náhradní kontaktní polokoule, která substituuje obdélníkový kontaktní dílec:

$$D_1 = \sqrt{a_1 \cdot b_1} = \sqrt{10 \cdot 60} = 24,495 \text{ mm}^2, \quad (5.28)$$

kde a a b jsou lineární rozměry obdélníkového kontaktního dílce.

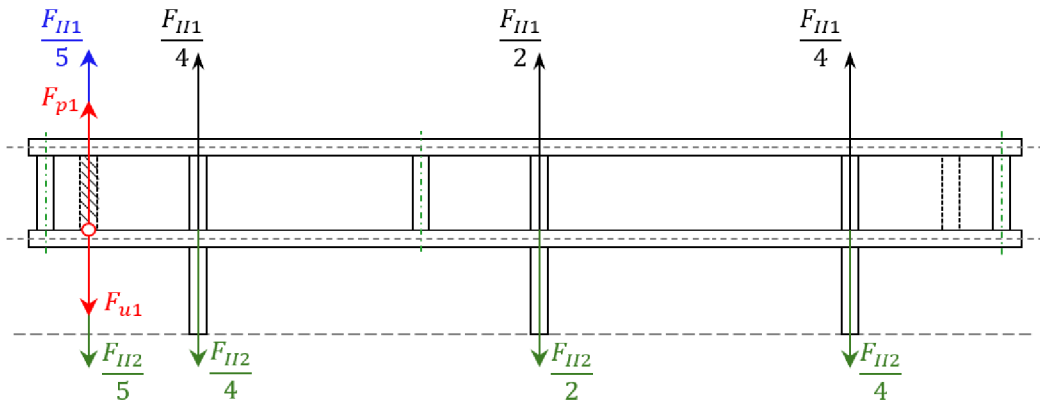
Při dosazení hodnot d a D do rovnice (5.26) získáme odpudivou sílu F_{u1} :

$$F_{u1} = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142,5 \cdot 10^3}{4} \right)^2 \cdot \ln \frac{24,495 \cdot 10^{-6}}{1,118 \cdot 10^{-3}} = -484,916 \text{ N}, \quad (5.29)$$

Podle podmínky $F_u < F_p$ platí:

$$[|F_{u1}| = |-484,916| \text{ N}] < [F_{p1} = (2 \cdot 270) = 540 \text{ N}], \quad (5.30)$$

tudíž při průchodu zkratového proudu kontaktní styk setrvá v sepnutém stavu, a nenastane nechtěné rozepnutí obvodu.



Obrázek 5.13 Rozložení vypočtených sil na pár nožů jedné fáze

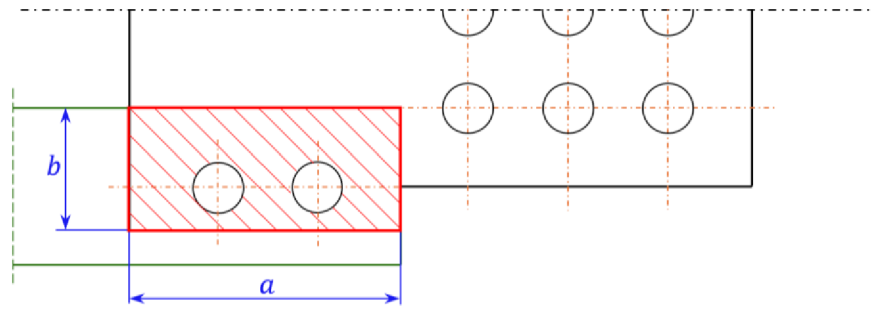
Pokud podmínku rozšíříme o silové účinky mezi noži jedné fáze (viz. kapitola 5.2.3), dostaneme vztah:

$$F_{u_celkem} = |F_{u1}| + \frac{F_{H2}}{5} = |-484,916| + \frac{779,02}{5} = 640,72 \text{ N}; \quad (5.31)$$

$$F_{p_celkem} = F_{p1} + \frac{F_{H1}}{5} = 540 + \frac{1517,47}{5} = 843,494 \text{ N}; \quad (5.32)$$

$$F_{u_celkem} = 640,72 \text{ N} < F_{p_celkem} = 843,494 \text{ N}; \quad (5.33)$$

5.5.2 Kontaktní styk praporec-spojovací destička



Obrázek 5.14 Kontaktní styková plocha mezi praporem a spojovací destičkou

Kontaktní styk mezi praporem a spojovací destičkou se nachází mezi úseky 3 a 4 a v proudovodné dráze jedné fáze je čtyřikrát.

Pro výpočet kulové stykové plochy proudové úžiny d je kontaktní přitlačná síla zajištěna dvěma šrouby M16 tvrdosti 8,8 (ocel). Teoretická přitlačná síla jednoho šroubu při dotažení momentem 200 Nm je rovna 67 kN. Při zkratovém proudu dochází k tepelnému namáhání konstrukčních částí a snižuje se přitlačná síla. To je respektováno podílem jmenovitého a dynamického proudu a vztah pro přitlačnou sílu jednoho šroubu během zkratu vypadá:

$$F_{p2} = F_{pM16} \cdot \frac{I_r}{i_d} = 66955 \cdot \frac{3150}{142500} = 1480,06 \text{ N} \quad (5.34)$$

Výpočet kulové stykové plochy proudové úžiny d :

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot F_{p2}}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 1480,06}{\pi \cdot 550 \cdot 10^6}} = 2,618 \text{ mm} \quad (5.35)$$

Ve výpočtu rozměru D se musí respektovat dva otvory kruhového průřezu, které jsou určeny pro šrouby M16;

$$D_2 = \sqrt{(a_2 \cdot b_2) - (2\pi \cdot r^2)} = \sqrt{(45 \cdot 80) - (2\pi \cdot 9^2)} = 55,6 \text{ mm}^2 \quad (5.36)$$

$$F_{u2} = 10^{-7} \cdot \left(\frac{142,5 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot \ln \frac{55,6 \cdot 10^{-6}}{2,618 \cdot 10^{-3}} = -1955,48 \text{ N}, \quad (5.37)$$

Pro použití podmínky $F_u < F_p$ dosadíme za sílu F_p přitlačnou sílu dvou šroubů M16 při zkratovém proudu;

$$[|F_{u2}| = |-1955,48| \text{ N}] < [F_{p2} = (2 \cdot F_{p2}) = 2960,12 \text{ N}], \quad (5.38)$$

z čehož vyplývá, že šrouby M16 tvrdosti 8,8 dokážou při průchodu zkratového proudu udržet potřebný kontaktní přitlak.

5.6 Shrnutí výsledků elektrodynamických účinků

Přitažlivé síly mezi jednotlivými noži působí dvěma způsoby. Žádoucím účinkem je přitlačná síla na pohyblivý kontaktní styk (praporec-nůž), zatímco nežádoucím účinkem jsou přitažlivé síly mezi samostatnými noži. Tento nežádoucí účinek eliminují distanční nerezové rozpěrky umístěné jak mezi páry jedné fáze, tak mezi noži jednoho páru. Jedna soustava nožů má celkem pět distančních rozperek mezi noži jednoho páru a tři rozpěrky mezi páry nožů jedné fáze. Přitažlivá síla mezi noži jednoho páru vyšla $F_{II1} = 1517,47 \text{ N}$ a síla mezi vnitřními noži párů jedné fáze vyšla $F_{II2} = 779,02 \text{ N}$.

Dalším problematickým místem je praporec, který představuje pravouhlý „L“ záhyb v proudovodné dráze. Vzniklé síly působí deformačně ve směru narovnání praporce do přímky jak na přívodní, tak na vývodní praporce všech fází. Maximální síla působící v oblasti ohybu na vodorovné rameno praporce vyšla $F_l = 1307,71 \text{ N}$ a na svislé rameno praporce vyšla $F_h = 1098,05 \text{ N}$. Pod vodorovným ramenem musejí silovému namáhání odolávat izolátory. Izolátory podle katalogových parametrů (viz. **tabulka 5.3**) vyhovují. Svislá síla působí na pohyblivý nůž ve směru vyhození nože do vypnuté polohy.

Pohyblivý kontakt je nejkritičtější místem pro řešení elektrodynamických účinků zkratového proudu, obzvlášť pro odpojovač, kdy nesmí dojít k rozpojení obvodu, pokud jím protéká proud. Na tento kontakt působí také úseky rovnoběžné s pohyblivým nožem. Z hlediska proudovodné dráhy na nůž působí vodorovné rameno praporce a spojovací konstrukční destička, která spojuje praporce s přívodními kabely. Síla působící mezi nožem (*úsek 1*) a vodorovným ramenem praporce (*úsek 3*) vyšla $F_{1-3} = 173,02 \text{ N}$ a mezi nožem a spojovací destičkou (*úsek 4*) vyšla $F_{1-4} = 482,13 \text{ N}$. Tyto síly působí proti síle F_h vzniklé „L“ záhybem praporce.

V samotném kontaktním styku vznikají průchodem proudu odpudivé síly, které jsou důsledkem mikroskopicky nedokonalého povrchu stykových materiálů. Tato odpudivá síla, též známá jako Holmova úžinová síla, vyšla $F_u = -484,916 \text{ N}$. Při zvážení všech sil působících na pracovní kontakt (viz. **kapitola 5.5.1**), konstrukční uspořádání přístroje odolává silovým účinkům a nežádoucí rozepnutí obvodu během doby zkratu, kdy odpojovačem protéká zkratový proud, nehrozí.

Z hlediska elektrodynamických účinků zkratového proudu na proudovodnou dráhu daný odpojovač typu KBE podle teoretických výpočtů vyhovuje.

6. VÝPOČET KRÁTKODOBÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE KBE

Použité postupy výpočtu vychází z teoretické části popsané v **kapitole 2.4.1**. Hlavním materiálem proudovodné dráhy daného odpojovače KBE je elektrovedná měď, která je na kontaktních částech postříbřená. Hlavním účelem postříbření je zvýšení elektrické vodivosti.

Tabulka 6.1 Fyzikální a elektrické veličiny použitých elektrovedných materiálů

Druh materiálu	Teplota tání	Teplota měknutí	Hustota	Měrný el. odpor	Tep. činitel odporu	Měrné teplo
	T_t [°C]	T_m [°C]	s [10^3 kg m^{-3}]	ρ_{40} [$10^{-8} \Omega \text{ m}$]	α_{40} [10^{-3} K^{-1}]	c [$10^6 \text{ Ws m}^{-3} \text{ K}^{-1}$]
měď	1083	190	8,9	1,92	3,6	3,4
stříbro	960	180	10,5	1,82	3,8	2,4

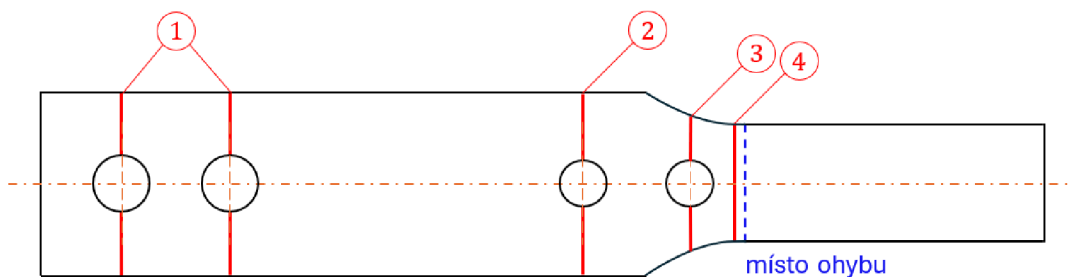
6.1 Změny průřezu

Při změně průřezu dochází ke změně proudové hustoty, a tedy hlavně v případě zkratů ke změně účinků průchodu proudu obvodem. Nejkritičtější změny průřezu se nachází hlavně u konstrukčních částí praporec a nůž.

K výpočtu jsou potřebné hodnoty oteplení jmenovitým proudem. Tyto hodnoty byly poskytnuté firmou IVEP ve zkoušce trvalým proudem provedené na daném odpojovači KBE. Použité hodnoty oteplení jsou orientační, protože oteplení bylo měřeno jen v určitých místech, nikoliv v úsecích důležitých z hlediska krátkodobého oteplení.

Maximální oteplení zkratovým proudem T_k je ve všech úsecích spočteno pro doby zkratu $t_{k1} = 1 \text{ s}$ a $t_{k3} = 3 \text{ s}$, pro které byla provedena experimentální zkouška.

6.1.1 Změny průřezu – praporec



Obrázek 6.1 Označená kritická místa pro krátkodobé oteplení na praporci

Výpočty podle postupu v kapitole 2.4.1 pro vyznačené úseky na obrázku 6.1;

1) Úsek 1;

$$\rho_{n1} = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 56) = 2,307 \cdot 10^{-8} \Omega m \quad (6.1)$$

Pro $t_{k1} = 1$ s:

$$\theta_{k1-1s} = \frac{(64,92 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,307 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 28,6 K \quad (6.2)$$

$$T_{k1-1} = 40 + 56 + 28,6 = 124,6 \text{ }^\circ C \quad (6.3)$$

Pro $t_{k3} = 3$ s:

$$\theta_{k1-3s} = \frac{(64,92 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,307 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 85,8 K \quad (6.4)$$

$$T_{k1-3} = 40 + 56 + 85,8 = 181,8 \text{ }^\circ C \quad (6.5)$$

2) Úsek 2;

$$\begin{aligned} \rho_{n2} = \rho_{n3} = \rho_{n4} &= 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 57) \\ &= 2,314 \cdot 10^{-8} \Omega m \end{aligned} \quad (6.6)$$

Pro $t_{k1} = 1$ s:

$$\theta_{k2-1s} = \frac{(58,16 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 23 K \quad (6.7)$$

$$T_{k2-1} = 40 + 57 + 23 = 120 \text{ }^\circ C \quad (6.8)$$

Pro $t_{k3} = 3$ s:

$$\theta_{k2-3s} = \frac{(58,16 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 69 K \quad (6.9)$$

$$T_{k2-3} = 40 + 57 + 69 = 166 \text{ }^\circ C \quad (6.10)$$

3) Úsek 3;

Pro $t_{k1} = 1$ s:

$$\theta_{k3-1s} = \frac{(76 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 39,3 K \quad (6.11)$$

$$T_{k3-1} = 40 + 57 + 39,3 = 136,3 \text{ }^\circ C \quad (6.12)$$

Pro $t_{k3} = 3 \text{ s}$:

$$\theta_{k3-3s} = \frac{(76 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 117,9 \text{ K} \quad (6.13)$$

$$T_{k3-3} = 40 + 57 + 117,9 = 214,9 \text{ °C} \quad (6.14)$$

4) Úsek 4;

Pro $t_{k1} = 1 \text{ s}$:

$$\theta_{k4-1s} = \frac{(75 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 38,3 \text{ K} \quad (6.15)$$

$$T_{k4-1} = 40 + 57 + 38,3 = 135,3 \text{ °C} \quad (6.16)$$

Pro $t_{k3} = 3 \text{ s}$:

$$\theta_{k4-3s} = \frac{(75 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 114,9 \text{ K} \quad (6.17)$$

$$T_{k4-3} = 40 + 57 + 114,9 = 211,9 \text{ °C} \quad (6.18)$$

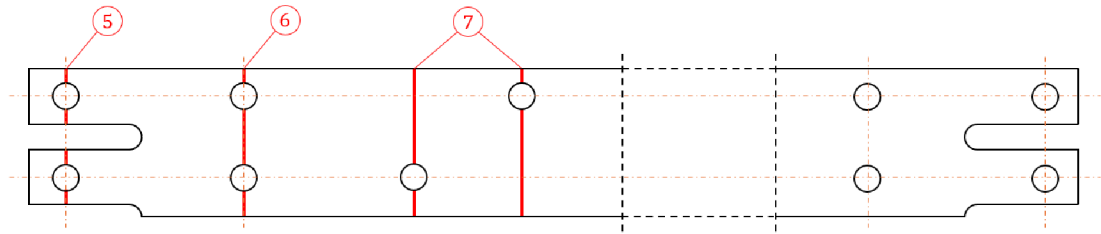
Tabulka 6.2 Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v jednotlivých místech na praporci

úsek	S [mm ²]	σ_k [10 ⁶ A m ⁻²]	ρ_n [10 ⁻⁸ Ω m]	$t_{k1} = 1 \text{ s}$		$t_{k3} = 3 \text{ s}$	
				θ_{kn-1} [K]	T_{kn-1} [°C]	θ_{kn-3} [K]	T_{kn-3} [°C]
1	439	64,92	2,307	28,6	124,6	85,8	181,8
2	490	58,16	2,314	23	120	69	166
3	375	76	2,314	39,3	136,3	117,9	214,9
4	380	75	2,314	38,3	135,3	114,9	211,9

Hodnota teploty měknutí pro stříbro se od mědi liší o pouhých 10 °C (viz. **tabulka 6.1**) a proto se zavede zjednodušení a praporec bude uvažován jako čistě měděná část proudovodné dráhy.

Vypočtené maximální teploty při zkratu po dobu $t_{k3} = 3 \text{ s}$ pro úseky 3 a 4 přesahují mez teploty měknutí pro měď 190 °C, a to přibližně o 15 %. Při měknutí dochází ke změně mechanických vlastností materiálu a znatelně roste odpor. Pokud teplota dosáhne mezi měknutí, představuje to nárůst odporu přibližně o 150 %. Tento nežádoucí účinek je jeden z nejčastějších důvodů, proč zkratové zkoušky nevyhoví předepsaným normám.

6.1.2 Změny průřezu – nůž



Obrázek 6.2 Označená kritická místa pro krátkodobé oteplení na noži

Pro nůž platí stejný postup výpočtů jako pro praporec.

Úsek 5 se nachází před kontaktním stykem. Největší změnou průřezu jsou otvory pro šroubové spoje na uchycení distanční rozpěrky, která působí proti silovým účinkům průchodu zkratového proudu kontaktním stykem. Jelikož se tento úsek nenachází na hlavní proudovodné dráze proudu, uvažuje se, že tímto místem neteče plná hodnota proudu. Proto tento úsek nemusíme považovat za kritický z hlediska krátkodobého oteplení.

Výpočet podle postupu v kapitole 2.4.1 pro vyznačené úseky na obrázku 6.2:

1) Úsek 6;

$$\begin{aligned}\rho_{n6} = \rho_{n7} &= 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 57) \\ &= 2,314 \cdot 10^{-8} \Omega m\end{aligned}\quad (6.19)$$

Pro $t_{k1} = 1$ s:

$$\theta_{k6-1s} = \frac{(72 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 35,3 \text{ K} \quad (6.20)$$

$$T_{k6-1} = 40 + 57 + 35,3 = 132,3 \text{ °C} \quad (6.21)$$

Pro $t_{k3} = 3$ s:

$$\theta_{k6-3s} = \frac{(72 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 105,9 \text{ K} \quad (6.22)$$

$$T_{k6-3} = 40 + 57 + 105,9 = 202,9 \text{ °C} \quad (6.23)$$

2) Úsek 7;

Pro $t_{k1} = 1$ s:

$$\theta_{k7-1s} = \frac{(57 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 22,1 \text{ K} \quad (6.24)$$

$$T_{k7-1} = 40 + 57 + 22,1 = 119,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.25)$$

Pro $t_{k3} = 3 \text{ s}$:

$$\theta_{k7-3s} = \frac{(57 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 66,3 \text{ K} \quad (6.26)$$

$$T_{k7-3} = 40 + 57 + 66,3 = 163,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.27)$$

Tabulka 6.3 Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v jednotlivých místech na noži

úsek	S [mm ²]	$\sigma_k [10^6 \text{ A m}^{-2}]$	$\rho_n [10^{-8} \Omega \text{ m}]$	$t_{k1} = 1 \text{ s}$		$t_{k3} = 3 \text{ s}$	
				$\theta_{kn-1} [\text{K}]$	$T_{kn-1} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{kn-3} [\text{K}]$	$T_{kn-3} [^\circ\text{C}]$
6	199	72	2,314	35,3	132,3	105,9	202,9
7	249,5	57	2,314	22,1	119,1	66,3	163,3

Nejkritičtějším místem, kde nastává měknutí, je *úsek 6*, který je v proudovodné dráze nože celkem dvakrát. *Úsek 7* na rozdíl od předchozího úseku má rezervu přibližně 30 °C do meze měknutí mědi, 190 °C.

6.2 Kontaktní styk

Materiály kromě meze měknutí mají také mez svaření, která je používána hlavně ve výpočtech oteplení v kontaktech. Svaření pohyblivých kontaktů je nežádoucí účinek ve všech spínacích přístrojích, a obzvlášť pro odpojovač, který slouží jako viditelné odpojení obvodu od napětí.

Nejkritičtějším místem pro vznik svaru je pohyblivý kontakt mezi praporcem a nožem (viz. **obrázek 5.2**);

$$\rho_n = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 57) = 2,314 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} \quad (6.28)$$

Pro $t_{k1} = 1 \text{ s}$:

$$\theta_{k-1s} = \frac{(228,4 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 1 = 355,04 \text{ K} \quad (6.29)$$

$$T_{k-1} = 40 + 57 + 355,04 = 452,04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.30)$$

Pro $t_{k3} = 3 \text{ s}$:

$$\theta_{k-3s} = \frac{(228,4 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 = 1065,12 \text{ K} \quad (6.31)$$

$$T_{k-3} = 40 + 57 + 1065,12 = 1162,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.32)$$

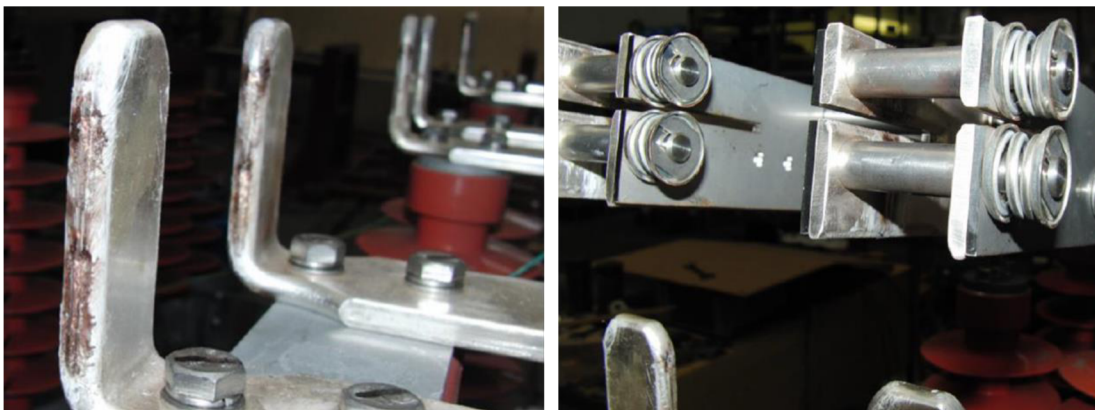
Tabulka 6.4 Výsledky výpočtů oteplení zkratovým proudem v pohyblivém kontaktu

S [mm ²]	σ_k [10 ⁶ A m ⁻²]	ρ_n [10 ⁻⁸ Ω m]	$t_{k1} = 1 \text{ s}$		$t_{k3} = 3 \text{ s}$	
			θ_{kn-1} [K]	T_{kn-1} [°C]	θ_{kn-3} [K]	T_{kn-3} [°C]
62,4	228,4	2,314	355,04	452,04	1065,12	1162,12

Teplota svaření pro měď je 1083 °C a pro stříbro 960 °C. Pro zkrat po dobu $t_{k1} = 1 \text{ s}$ materiály jsou nad teplotou měknutí a vytvoření svaru nehrozí. Pro $t_{k3} = 3 \text{ s}$;

$$[T_{k-3} = 1162,12 \text{ K}] > [T_{Cu,S} = 1083 \text{ °C}] \quad (6.33)$$

Podle teoretických výpočtů dojde na pohyblivém kontaktu ke svaru. Praktické výsledky vychází z experimentální zkoušky, kdy při $t_{k3} = 3 \text{ s}$ zkratu nevznikl svar, ale došlo k lehkému mechanickému poškození (viz. **obrázek 6.3**), které ale nepřekáželo při bezprostředním vypnutí naprázdno, kdy potřebná síla k vypnutí nepřekročila stanovenou mez pro ovládání podle normy ČSN EN 62271-102 ed.2 [6].



Obrázek 6.3 Kontaktní místo odpojovače typu KBE po zkratové zkoušce

Rozdíly mezi teoretickými a praktickými výsledky jsou zdatelně ovlivněné zavedením různých zjednodušení a skutečností, kdy se při teoretických výpočtech uvádějí nejhorší okolnosti v době vzniku zkratu. V praxi je minimální šance po vznik zkratu v době, kdy jsou všechny okolnosti v nejhorších podmínkách (více v **kapitolách 1.3 a 2.1**).

Největší vliv na oteplení kontaktu má proudová hustota, podíl zkratového dynamického proudu i_d a kontaktní stykové plochy S . Pro názornou ukázkou, při použití průřezu 60 mm², dostaneme teplotu:

$$T_{k60} = \frac{(237,5 \cdot 10^6)^2 \cdot 2,314 \cdot 10^{-8}}{3,4 \cdot 10^6} \cdot 3 + 40 + 57 = 1249 \text{ °C} \quad (6.34)$$

Při pouhé změně 2,4 mm² je rozdíl teplot:

$$\Delta T = T_{k60} - T_{k-3} = 1249 - 1162,12 = 86,9 \text{ °C} \quad (6.35)$$

Následující kapitola se věnuje možnému dosažení lepších teoretických výpočtů (bližších experimentální zkoušce) pro krátkodobé oteplení v kontaktním styku.

6.3 Zlepšení kontaktního styku

Při průchodu zkratového proudu 57 kA obvodem odpojovače je největším problémem vznik svaru na pohyblivém kontaktu při $t_{k3} = 3$ s.

K zamezení vytvoření svaru je potřeba snížit oteplení zkratovým proudem. Ze **vztahu (2.8)** lze říct, že oteplení zkratovým proudem závisí na použitém proudovodném materiálu a na proudové hustotě, tedy na velikosti proudu vyskytujícího se v dané části obvodu a velikosti stykové plochy.

6.3.1 Změna materiálu

Při použití jiného materiálu se musí vzít v úvahu všechny jeho fyzikální a elektrické vlastnosti. Při použití materiálu, který má větší meze měknutí nebo svaření, nastává problém hlavně s velkým měrným elektrickým odporem. Takové materiály špatně vedou elektrický proud a jejich použití je nežádoucí. Mezi tyto materiály řadíme například ocel.

Materiály, které mají větší meze měknutí a svaření a zároveň jejich měrný elektrický odpor vyhovuje podmínkám proudovodné dráhy, jsou drahé a není tedy možné je použít v tak velkém množství, jako například měď.

6.3.2 Změna proudové hustoty

Při zachování proudu se proudová hustota dá snížit zvětšením stykové plochy. Dalším pozitivním účinkem při zvětšení stykové plochy je zmenšení silových účinků, a pokud by došlo k rapidnímu poklesu, pro potřebnou přitlačnou sílu by mohla být použita i jedna pružina namísto dvou.

Nežádoucím účinkem by byl rapidní vzrůst odporu v konstrukční části praporce, a pokud by nové rozměry oddálily nože v jednom páru, mohlo by dojít ke zmenšení přitažlivých sil, které působí proti odpudivé kontaktní síle.

6.3.3 Rozdělení proudovodné dráhy

Další možností, jak snížit proudovou hustotu, je rozdělení proudovodné dráhy do více paralelních větví. Tehdy by došlo k většímu rozdělení proudu a proudová hustota by klesla ve všech nožích, praporcích, a hlavně v kontaktním pracovním styku.

Nežádoucím účinkem by byl vznik většího skin-efektu. Došlo by k větší nerovnoměrnosti rozložení proudu do daných větví a na každou konstrukčně osově souměrnou část by působily jinak velké síly. Řešením by byla rozdílná konstrukce všech paralelních větví, ale to by představovalo složitost a finanční vyčerpání ve výrobě.

6.4 Zvětšení odporu po zkratu

Další důležitou podmínkou, kterou určuje norma ČSN EN 62271-1 [5], aby daný přístroj vyhověl, je ověření proudové schopnosti hlavního obvodu.

Podle dané normy [5] nesmí naměřený elektrický odpor R_k po zkratu přesáhnout 1,2x násobek elektrického odporu R_u naměřeného před zkouškou trvalým proudem, a tedy i před zkratem. Vyhodnocení stavu odpojovače po zkratové zkoušce je provedeno porovnáním těchto dvou hodnot elektrického odporu R_u a R_k pro zvolenou část proudovodné dráhy co nejbližší ke kontaktům.

6.4.1 Odpor nože

Pro zjednodušení výpočtu budeme uvažovat, že hlavní částí proudovodné dráhy odpojovače mezi hlavními kontakty jsou nože. Pro výpočty elektrického odporu před prvním zkratem R_{un} při okolní teplotě 20 °C a po druhém zkratu ($t_{k3} = 3$ s) R_{kn} je použit vztah (2.11);

$$\begin{aligned} R_{un} &= 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20)) \cdot \frac{665 \cdot 10^{-3}}{300 \cdot 10^{-6}} \\ &= 45,6 \mu\Omega \end{aligned} \quad (6.36)$$

$$\begin{aligned} R_{kn} &= 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (181,8 - 57 - 20)) \\ &\quad \cdot \frac{665 \cdot 10^{-3}}{300 \cdot 10^{-6}} = 58,6 \mu\Omega \end{aligned} \quad (6.37)$$

Podmínka pro vypočtené odpory R_{un} a R_{kn} podle normy ČSN EN 62271-1 [5]:

$$(R_{un} \cdot 1,2) > R_{kn} , \quad (6.38)$$

$$(45,6 \cdot 1,2 = 54,72) < 58,6 ,$$

Podle teoretických výpočtů není podmínka v dané konstrukční části (noži) splněna a spínací přístroj z hlediska proudové schopnosti po zkratu $t_{k3} = 3$ s nevyhověl. Tento výrok se shoduje s provedenou zkratovou zkouškou s odchylkou 5-10 % pro všechny fáze.

ZÁVĚR

V první kapitole bakalářské práce byl zpracován teoretický rozbor spínacích přístrojů. Pozornost byla věnována hlavně základnímu rozdělení a principům jednotlivých spínacích přístrojů. Detailnější popis se zaměřoval na odpojovače, kterým se v průběhu práce věnuje výpočet elektrodynamických účinků zkratového proudu a krátkodobého oteplení.

V dalších kapitolách je okomentována problematika zkratového proudu a následně seznámení s českou firmou IVEP, a.s. a s jejich rozsáhlou katalogovou nabídkou.

Čtvrtá kapitola obsahuje obecné pracovní podmínky a typové zkoušky z normy příslušné k spínacím přístrojům vn, a z normy věnované přímo odpojovačům střídavého proudu. Zmíněna a popsána byla hlavně typová zkouška krátkodobým a dynamickým výdržným proudem, kterou prošel samotný odpojovač KBE.

Další dvě kapitoly jsou věnovány samotným výpočtům. V páté kapitole bylo počítáno silové působení na jednotlivé konstrukční části daného odpojovače KBE při průchodu dynamického proudu 142,5 kA. Hlavní podmínkou byl vztah $F_u < F_p$ pro kontaktní styk mezi praporcem a nožem; Celková přitlačná kontaktní síla vyšla 843,5 N a celková odpudivá síla vyšla 640,7 N. Podle teoretických výsledků daná konstrukce proudovodné dráhy odpojovače zajišťuje odolnost kontaktního spoje proti dynamickým účinkům a nedojde tedy k nežádoucímu vypnutí. Detailnějšímu popisu výsledků se věnuje **kapitola 5.6.**

V šesté kapitole byly počítány nejkritičtější místa z hlediska krátkodobého oteplení průchodem zkratového proudu. Rizikovým místem je propojovací praporec, jehož část se zmenšeným průřezem je za mezí teploty, při které měď měkne (viz. **kapitola 6.1.1**). Podle výpočtů je nejrizikovějším místem kontaktní styk mezi praporcem a nožem, kde oteplení zkratovým proudem vychází 80 °C nad mez svaření mědi. Z důvodu zavádění mnoha zjednodušení a použití nejhoršího průběhu zkratového proudu při výpočtu, se teoretické výsledky silně liší od zkratové zkoušky, kdy pro teoretické výsledky vyšel velice pravděpodobný svar, zatímco po zkratové zkoušce nedošlo ke svaru, ale jen k lehkému poškození, které neomezilo bezprostřední vypnutí naprázdno. Následně jsou probrány možné konstrukční úpravy odpojovače pro zlepšení kontaktního styku.

Všechny teoretické výpočty, které popisují chování proudovodné dráhy během zkratu, jsou srovnatelné s výsledky experimentální zkoušky provedené na daném odpojovači. Z hlediska norem pro jednosekundový i třisekundový zkrat se kontroluje mechanické poškození odpojovače po zkratu, bezprostřední vypnutí naprázdno po zkratu a zvýšení elektrického odporu hlavního obvodu s povolenou odchylkou 20 %.

V bakalářské práci byly použity teoretické úvahy a analytické vztahy, ale žádný simulační software se kterým by se dosáhlo pravděpodobně přesnějších výsledků.

LITERATURA

- [1] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [2] PETŘÍČEK, Ivo. *Spínací přístroje vysokého a velmi vysokého napětí I*. Online, prezentace předmětu Energetika. Průmyslovka Liberec. Dostupné z: https://www.pslib.cz/ivo.petricek/prezentace/vyuka_EEN/4_rocnik/. [cit. 2024-01-10].
- [3] IVEP, A.S. *O nás | IVEP*. Online. Dostupné z: <https://www.ivep.cz/cz/o-nas>. [cit. 2024-01-10].
- [4] IVEP, A.S. *Produkty firmy*. Online. Dostupné z: <https://www.ivep.cz/cz/produkty>. [cit. 2024-01-10].
- [5] ČSN EN 62271-1: *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [6] ČSN EN 62271-1: *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [7] TOMAN, P., DRÁPELA, J., MIŠÁK, S., ORSÁGOVÁ, J., PAAR, M., TOPOLÁNEK, D. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8
- [8] BLAŽEK, V.; SKALA, P. *Distribuce elektrické energie*. VUT v Brně. 2003. Dostupné z: www.vutbr.cz, [online], elektronický učební text.
- [9] HAVELKA, Otto, Zdeněk VÁVRA a Dalibor SVOBODA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1985.
- [10] ŠŤASTNÁ, Antonie. *Zkratová odolnost odpojovače KBE* [online]. Brno, 2024. [cit. 2024-05-24]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Bohuslav Bušov.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
EMC	Electro-Magnetic Compability
NN	Nízké napětí
VN	Vysoké napětí
VVN	Velmi vysoké napětí
ZVN	Zvlášť vysoké napětí
k_p	Korekční činitel tvaru průřezu
k_d	Korekční činitel konečné délky
AC	Střídavý proud
DC	Stejnoseměrný proud

Veličiny:

U	Napětí	(V)
I_n	Jmenovitý proud	(A)
I_k	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	(A)
i_{DC}	Stejnoseměrná složka proudu	(A)
i_k	Ustálená složka zkratového proudu	(A)
i_k'	Přechodová složka zkratového proudu	(A)
i_k''	Rázová složka zkratového proudu	(A)
i_d	Dynamický proud	(A)
b	Šířka vodiče	(mm)
h	Výška vodiče	(mm)
a	Vzdálenost středových os mezi dvěma vodiči	(mm)
l	Délka vodiče	(mm)
d	Průřez vodiče	(mm)
D	Průměr náhradní polokoule kontaktu	(mm ²)
T_{MAX}	Nejvyšší teplota okolí	(°C)
T_0	Teplota okolí	(°C)
T_k	Maximální teplota při zkratu	(°C)
T_t	Teplota tání	(°C)
T_m	Teplota měknutí	(°C)
θ_n	Oteplení jmenovitým proudem	(K)
θ_k	Oteplení za dobu zkratu	(K)
t_k	Doba zkratu	(s)
Φ	Vlhkost vzduchu	(%)

p	Tlak	(Pa)
F	Síla	(N)
R	Odpor	(Ω)
c	Objemová tepelná kapacita	($\frac{Ws}{m^3K}$)
V	Objem	(mm ³)
α	Teplotní činitel odporu	(K ⁻¹)
ρ	Měrný elektrický odpor	(Ωm)