

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

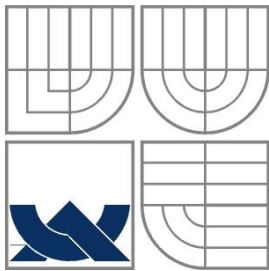
## **OPTIMALIZACE TVARU PARALELNÍCH PROUDOVODNÝCH DRAH ODPOJOVAČE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

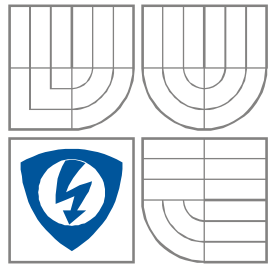
Bc. Tomáš Görig

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY  
A ELEKTRONIKY**

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

# **OPTIMALIZACE TVARU PARALELNÍCH PROUDOVODNÝCH DRAH ODPOJOVAČE**

**DISCONNECTOR PARALLEL CURRENT PATHS OPTIMIZATION**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

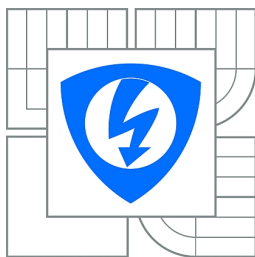
AUTHOR

**Bc. TOMÁŠ GÖRIG**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. PETR DOHNAL, Ph.D.**



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

**Student:** Bc. Tomáš Görig

**ID:** 132979

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Optimalizace tvaru paralelních proudovodných drah odpojovače**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Seznamte se s funkcí a návrhem odpojovačů VN pro vysoké proudy
- 2) Proveďte výpočet rozložení proudové hustoty pro odpojovač 22kV se třemi paralelními noži
- 3) Navrhněte a ověřte výpočtem alternativní řešení odpojovače

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 26.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Dohnal, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vyšetřením stávajícího tvaru proudovodné dráhy odpojovače. V té je nerovnoměrně rozložen protékající proud a to způsobuje nadměrné oteplování právě ve více namáhaným částech. Následně je navrženo několik možností optimalizace proudovodné dráhy. Tyto možnosti jsou ověřeny simulací a zadavateli práce je doporučeno nejvýhodnější řešení.

## Abstract

The objective of this master's thesis is diagnostic the actual disconnecter current path that is unevenly stressed by nominal current. The most stressed parts are excessively heated. In next part are projected a few options to optimize the current path. The options are verified by simulation. The best option is recommended to the submitter.

### Klíčová slova

Odpojovač; optimalizace; proudovodná dráha; simulace; proudová hustota; Jev blízkosti; kombinovaný Jev blízkosti; blízké feromagnetikum

### Keywords

Disconnecter; optimization; current path; simulation; current density; proximity effect; combined proximity effect; feromagnetic

## Bibliografická citace

GÖRIG, T. Optimalizace tvaru paralelních proudovodných drah odpojovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Dohnal, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Optimalizace tvaru paralelních proudovodných drah odpojovače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

## Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce, panu Ing. Petru Dohnalovi, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

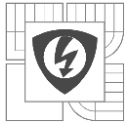
V Brně dne ..... Podpis autora .....



## OBSAH

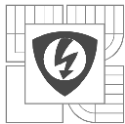
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>1 VN ODPOJOVAČ.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 TYPY ODPOJOVAČE .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 KONSTRUKCE ODPOJOVAČE .....</b>	<b>15</b>
1.2.1 KONSTRUKČNÍ MATERIÁLY .....	17
1.2.2 VÝZBROJ.....	18
<b>1.3 MODIFIKACE ODPOJOVAČE.....</b>	<b>18</b>
1.3.1 ODPOJOVAČ S UZEMŇOVAČEM.....	18
1.3.2 ODPÍNAČ .....	18
1.3.3 ODPOJOVAČ S POJISTKOVÝM SPODKEM.....	19
1.3.4 PŘEPOJOVAČ .....	19
<b>1.4 ZKOUŠKY ODPOJOVAČE .....</b>	<b>19</b>
<b>2 POPIS PROBLÉMU, DŮSLEDKY .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 JEV BLÍZKOSTI (PROXIMITY EFFECT) .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 POVRCHOVÝ JEV (SKIN EFFECT) .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3 KONKRÉTNÍ SITUACE.....</b>	<b>24</b>
<b>3 VÝPOČET A SIMULACE STÁVAJÍCÍHO STAVU.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 ANALYTICKÝ VÝPOČET .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 SIMULACE.....</b>	<b>30</b>
3.2.1 OVĚŘENÍ MOŽNOSTI ZANEDBÁNÍ POVRCHOVÉHO JEVU SIMULACÍ.....	31
3.2.2 SIMULACE V PROGRAMU FEMM.....	32
3.2.3 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL 2D.....	35
3.2.4 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS MAXWELL 3D.....	37
<b>3.3 ZHODNOCENÍ.....</b>	<b>38</b>
<b>4 OVĚŘENÍ VÝPOČTU MĚŘENÍM .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 VOLBA VHODNÉ MĚŘICÍ METODY.....</b>	<b>39</b>
4.1.1 ROGOWSKEHO CÍVKA .....	39
4.1.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ.....	40
<b>4.2 REALIZACE MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE .....</b>	<b>40</b>
4.2.1 POŽADAVKY .....	40
4.2.2 ROGOWSKEHO CÍVKA .....	40
4.2.3 INTEGRÁTOR .....	42





---

4.2.4 KALIBRACE .....	44
<b>4.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SE SIMULACÍ.....</b>	<b>46</b>
<b>5 OPTIMALIZACE .....</b>	<b>48</b>
5.1 SE ZMĚNOU KONSTRUKCE .....	48
5.2 S VYUŽITÍM STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE .....	51
5.3 ZHODNOCENÍ.....	57
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>61</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>62</b>
PŘÍLOHA Č.1 – VÝSLEDKY SIMULACÍ SE ZMĚNOU KONSTRUKCE .....	62
PŘÍLOHA Č.2 – VÝSLEDKY SIMULACÍ S VYUŽITÍM STÁVAJÍCÍ KONSTRUKCE.....	63



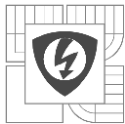
## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Schématické nákresy různých typů odpojovačů. 1. bokorys nožového odpojovače. 2. půdorys otočného odpojovače. 3. bokorys pantografického odpojovače. 4. bokorys výsuvného odpojovače.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Zjednodušený model nožového odpojovače [3] .....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3: Detailní pohled na kontakt nožového odpojovače. [1] pevný kontakt, [2] pohyblivé kontakty (nože), [3] distanční vložka, [4] šipky ukazují směr působení tlakové síly vyvolané pružinami (na obrázku pouze názorně naznačeny), [5]detail prolisu na kontaktu.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4: Odpojovač s jedním uzemňovačem IVEP QAKZ [1].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 5: Odpínač s pojistkovým spodkem IVEP FLESP [1] .....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 6: Zobrazení rozložení proudové hustoty ovlivněné Jevem blízkosti v řezu 1 pólu nožového kontaktu odpojovače tvořeného dvěma paralelními noži .....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 7: Oteplovací zkouška odpojovače IVEP QAKZ 52.2500.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 8: Rozložení proudové hustoty ovlivněné Povrchovým jevem ve vodiči obdélníkového průřezu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 9: Výsledek simulace rozložení proudové hustoty vlivem Povrchového jevu. Měděným vodičem o rozměrech 20 x 40 mm protéká proud <math>I = 5000</math> A o frekvenci <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 10: Nárýs, půdorys a oba bokorysy proudovodné dráhy odpojovače IVEP QAK 12.3150 .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 11: Celkový pohled na odpojovač IVEP QAK 12.3150.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 12: Řez noži jednoho pólu odpojovače IVEP QAK 12.3150. Červenou barvou je zobrazen obrys fiktivního vodiče a fiktivní střed F. ....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 13: Jednotlivé rozměry každého nože odpojovače.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 14: Pomůcka pro grafické určení velikosti činitele Jevu blízkosti. [6] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 15: Návrh metody výpočtu koeficientu <math>k_b</math>.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 16: Výsledek simulace, která potvrdila, že Povrchový jev je v tomto případě zanedbatelný. Simulace v programu FEMM, <math>I = 262,5</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 17: Simulace skutečného stavu rozložení proudové hustoty odpojovače IVEP QAK 12.3150 v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 18: Simulace skutečného stavu rozložení proudové hustoty odpojovače IVEP QAK 12.3150 v programu Ansys Maxwell 2D, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19: Naznačení řezů 3D modelem proudovodné dráhy.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 20: Rozložení proudové hustoty v řezech odpojovače IVEP QAK 12.3150 s ohledem na vliv pevných kontaktů. Simulace v programu Ansys Maxwell 3D, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 21: Ukázka konstrukčního požadavku na měřící přístroj.....</i>	<i>39</i>



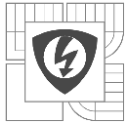
---

<i>Obrázek 22: Pohled na rozvinutou Rogowskeho cívku .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 23: Schéma zapojení integrátoru, červenou barvou jsou zobrazeny přednastavené hodnoty trimrů R1 a R2, které si při kalibraci budou dále upravovat. ....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 24: Integrátor na nepájivém kontaktním poli .....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 25: Návrh DPS pro integrátor a konečná verze integrátoru .....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 26: Převodní charakteristika Rogowskeho cívky s integrátorem Chauvin Arnoux A100 (<math>U_{skut}</math>) a cívky vyrobené (<math>U_{mer}</math>).....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 27: Pohled na měřicí pracoviště a detail umístění Rogowskeho cívky na nožích. ....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 28: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 43 mm (úprava č.1). Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 29: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 18 mm (úprava č.2). Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 30: Ukázka nevhodného umístění feromagnetika. Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.3. Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 31: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.4. Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 32: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.5. Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 33: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.6. Simulace provedena v programu FEMM, <math>I = 3150</math> A, <math>f = 50</math> Hz.....</i>	<i>56</i>



## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Výsledné teploty oteplovací zkoušky odpojovače IVEP QAKZ 52.2500, <math>t = 6,5</math> h.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 2: Elektrický odpor každého nože odpojovače a průřez nože .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Simulace v programu FEMM. Pro názornost je zobrazena také původní hodnota elektrického odporu každého nože (bez vlivu Jevu blízkosti) .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 4: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Simulace v programu Ansys Maxwell 2D. Pro názornost je zobrazena také původní hodnota elektrického odporu každého nože (bez vlivu Jevu blízkosti).....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5: Seznam měřících přístrojů použitých při kalibraci vyrobené Rogowského cívky s integrátorem .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6: Tabulka skutečných a naměřených hodnot napětí, přepočteného proudu dle převodních konstant (skutečná hodnota: 10mV/A, naměřená hodnota 2mV/A) a relativní chyba naměřené hodnoty .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí a spočtené hodnoty skutečného rozložení proudů na odpojovači IVEP QAK 12.3150. Také je zde vypočtena relativní chyba vztažená k celkovému proudu. ....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 8: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 43 mm (úprava č.1). Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 9: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 18 mm (úprava č.2). Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 10: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.3. Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 11: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.4. Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 12: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.5. Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 13: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.6. Simulace v programu FEMM. ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 14: Výsledná tabulka se sledovanými parametry včetně výběru nejvýhodnějšího řešení. Zobrazeny jsou, pro přehlednost, pouze nejefektivnější úpravy.....</i>	<i>57</i>



---

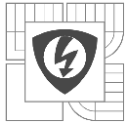
## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

### SYMBOLY:

$\partial$	Hloubka vniku	[m]
$\mu_0$	Permeabilita vakua	[Hm <sup>-1</sup> ]
a	Vzdálenost středů vodičů	[m]
d	Průměr	[m]
f	Frekvence	[Hz]
I	Elektrický proud	[A]
J	Proudová hustota	[Am <sup>2</sup> ]
$k_b$	Koeficient vlivu Jevu blízkosti	[-]
$k_s$	Koeficient vlivu Povrchového jevu	[-]
l	Délka	[m]
N	Počet závitů	[-]
o	Obvod	[m]
P	Elektrický výkon	[W]
R	Elektrický odpor	[Ω]
S	Obsah plochy	[m <sup>2</sup> ]
t	Čas	[s]
U	Elektrické napětí	[V]
$\delta$	Relativní chyba	[%]
$\vartheta$	Teplota	[°C]
$\rho$	Měrný elektrický odpor	[Ωm]

### ZKRATKY:

VN Vysoké napětí, vysokonapěťový



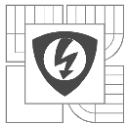
---

## ÚVOD

Návrhem jakéhokoliv přístroje se zabývá zpravidla konstruktér. Ten musí při návrhu zohlednit soubor technických požadavků, dodržet všechny stanovené podmínky a také ekonomičnost návrhu. Snaží se tedy o nalezení nejvýhodnější, tedy optimální možnosti. Tento proces se nazývá optimalizace. Z matematického hlediska je optimalizace hledání globálního extrému, tedy maxima nebo minima zadané funkce o určitém počtu proměnných – v tomto případě právě ekonomické a technické požadavky. Každý, nejen elektrický, přístroj nelze optimálně navrhnout bez toho, aby se alespoň část tohoto přístroje vyrobila a odzkoušela. Během zkoušek vyjdou najevo všechny drobné nedostatky či nedokonalosti. Přístroje se poté dále optimalizují na základě výsledků těchto zkoušek ještě ve fázi návrhu. Jakmile je dosaženo žádaného výsledku, postoupí se přístroj do další fáze výrobního procesu. Někdy však dojde k tomu, že dlouhodobé sledování přístroje v konkrétním provozu nebo snaha zdokonalit již existující přístroj ještě nalezne prostor pro další optimalizaci. Právě tímto se zabývá tato práce.

S optimalizací se v dnešní době setkáváme v každém odvětví lidské činnosti. Je to z důvodu konkurenčního boje mezi firmami a snaze dokonale uspokojit zákazníka, aby se vrátil. Dalším důvodem je jednoduchý přístup k výkonné výpočetní technice, která velice usnadňuje a urychluje výpočty spojené s optimalizací, zvláště u evolučních či genetických metod. Tyto stochastické metody se rozvíjejí právě díky vzestupu výpočetní techniky.

Práce je zadána a zhotovena ve spolupráci s firmou IVEP, a.s. a bude sloužit jako podpůrná literatura v oblasti navrhování proudovodných drah elektrických přístrojů.



## 1 VN ODPOJOVAČ

Odpojovač je spínací elektrický přístroj, jehož nejdůležitější funkcí je spolehlivě a viditelně rozpojit elektrický obvod. Používá se nejčastěji k odpojování částí, na kterých se provádí výměna, oprava nebo revize. V momentě spínání musí být obvod vždy rozpojený nějakým jiným, do série zapojeným spínačem, který je schopen vypínat provozní proudy, například vypínačem. Odpojovač není konstruován pro spínání poruchových a ani provozních proudů. Nicméně tyto proudy musí v sepnutém stavu spolehlivě vést a nesmí dojít k poškození.

VN neboli „vysokonapětový“ značí pracovní napětový stupeň. Vysoké napětí je dle normy napětí o velikosti 1000 V AC až 52 kV AC včetně.

### 1.1 Typy odpojovače

Odpojovače lze dělit dle celé škály kritérií. Pro hlavní přehled byla vybrána následující kritéria – pracovní prostředí, mechanismus kontaktu, způsob montáže a ovládání. Dělení dle počtu pólů je samozřejmostí.

Dle prostředí, kde budou pracovat lze odpojovače dělit do dvou skupin:

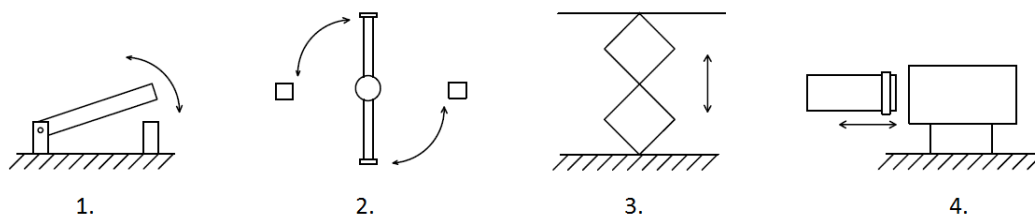
- Venkovní
- Vnitřní

Tyto skupiny lze dále dělit dle mechanismu:

- Nožové – Nejčastější provedení. Při použití nožů, které se skládají ze dvou dílčích a pevný kontakt je mezi nimi, je výhodou velice dobrá odolnost vůči účinkům zkratových proudů, právě kvůli geometrii proudovodné dráhy. Nevýhodou je složitější ovládací mechanismus, při konstrukci v praktickém provedení.
- Otočné – Při vhodné volbě mechanismu je výhodou právě jednoduchý mechanismus, kdy je pouze jeden pohyblivý díl, většinou nůž odpojovače.
- Pantografické – výhodou je jednoduchá montáž ke stávajícímu vedení, při připojování nových odboček, kdy není třeba toto vedení rozpojovat. Při spínání se kontakt pouze přiloží, či sevře jednoduchým nůžkovým mechanismem zespodu na vedení.
- Výsuvné – technologicky složitější, nejčastěji v kombinaci s růžicovým kontaktem. Používá se hlavně pro oblast vysokých proudů. Výhodou je dobrá odolnost vůči dynamickým účinkům zkratových proudů.

Nebo dle způsobu montáže:

- Do vedení (uchycení na lana)
- Vertikální
- Horizontální

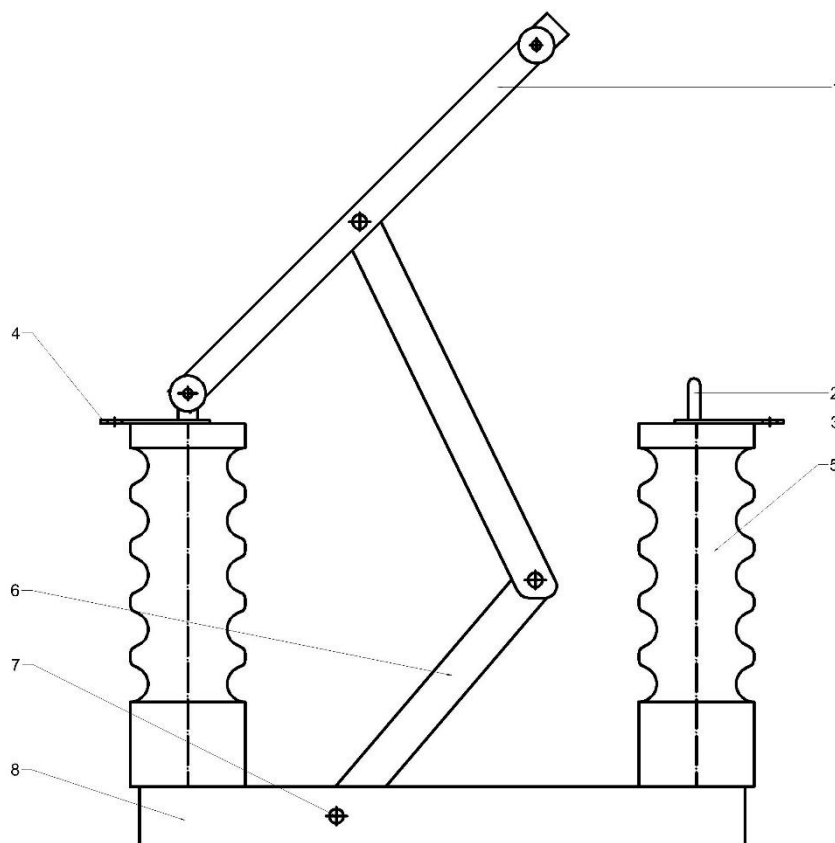


Obrázek 1: Schématické nákresy různých typů odpojovačů. 1. bokorys nožového odpojovače. 2. půdorys otočného odpojovače. 3. bokorys pantografického odpojovače. 4. bokorys výsuvného odpojovače

Nebo dle způsobu ovládní:

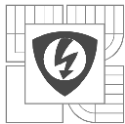
- Ruční
- Motorové
  - Elektrické
  - Hydraulické
  - Pneumatické

## 1.2 Konstrukce odpojovače



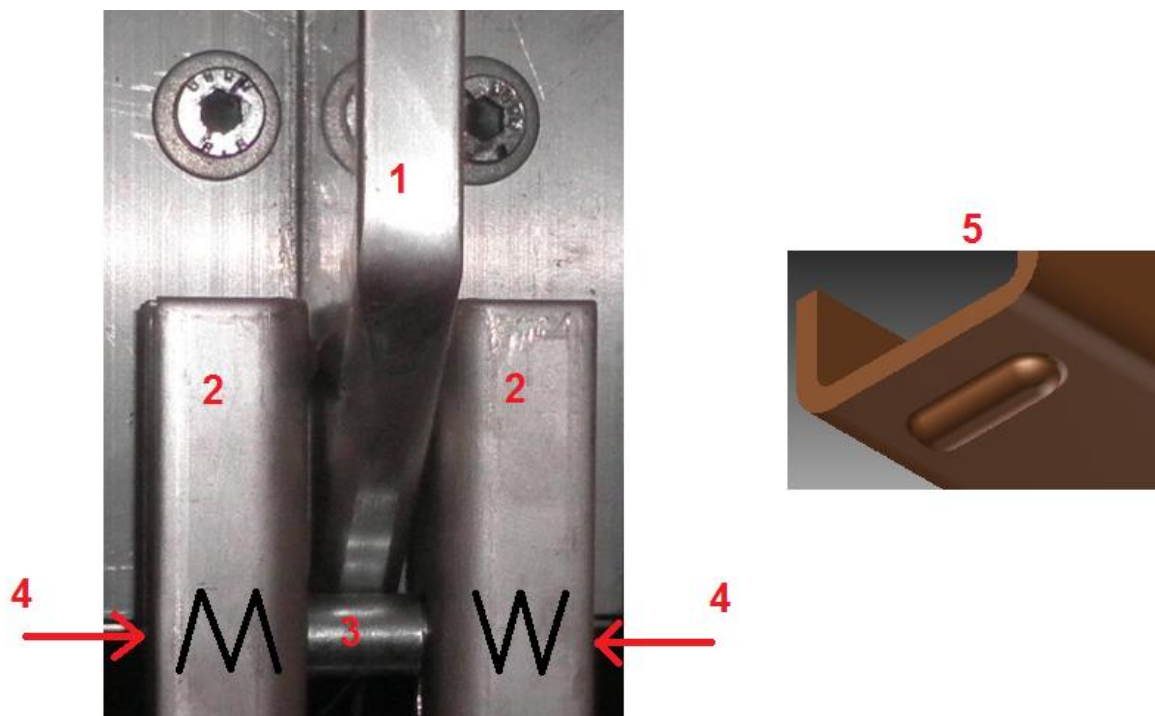
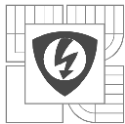
Obrázek 2: Zjednodušený model nožového odpojovače [3]





Na obrázku výše je zobrazen boční pohled na jednoduchý VN nožový odpojovač. Na tomto pohledu lze nejlépe sledovat funkci odpojovače a jeho částí. Celý přístroj je umístěn na nosném rámu, někdy též zvaném základna [8]. Izolované mechanické upevnění proudovodných a živých částí k nosnému systému v požadované vzdálenosti, která je dána napěťovou hladinou, je realizováno pomocí izolátorů [5]. U VN přístrojů tvoří hlavní rozměry právě izolační vzdálenosti mezi jednotlivými částmi, tedy mezi fází a zemí, mezi fázemi a také mezi rozpojenými kontakty. Typický stříškový tvar izolátorů je volen z důvodu prodloužení povrchové vzdálenosti mezi částmi s různým potenciálem. Pokud by tato vzdálenost byla nedostatečná mohlo by dojít k povrchovému výboji. Vzdálenost je volena úmyslně několikrát větší, než je potřeba, protože na povrchu izolátoru se usazují nečistoty a prach, které zvyšují vodivost. Dalším důvodem stříškovitého tvaru izolátoru, ovšem pouze u vnějších odpojovačů, je zabránění vytvoření souvislého vodního proudu po izolátoru při dešti.

Na horní straně izolátoru jsou připojovací svorky – přívod [4] a vývod [3]. Ty slouží k upevnění přívodů, a to jak kabelových, tak také pásových. Na horní straně je také pevný kontakt [2]. U nožového odpojovače se většinou jedná o jednoduchý kontakt, bez jakéhokoliv přitlačného prostředku. Ten totiž bývá umístěn na pohyblivém noži [1]. Ten se skládá ze dvou dílčích nožů, které jsou k sobě přichyceny v určité vzdálenosti za pomoci distančních vložek. Na nože přitom tlačí soustava silných pružin. Distanční vložky udržují nože v rozepnutém stavu od sebe v šířce mírně menší, než je šířka pevného kontaktu, aby po přechodu do sepnutého stavu vytvářely pružiny tlakovou sílu právě na pevný kontakt a nikoliv na distanční vložky (viz. Obrázek 2). V místě kontaktu jsou na nožích prolisy oválného půdorysu (viz. Obrázek 2 [5]) Tento tvar zajišťuje to, aby i při nedokonalém uložení základny případně mírné mechanické deformaci, byl kontakt vždy přímkový Pohyb nože zajišťuje pákový mechanismus [6], který převádí otočný pohyb ovládací hřídele [7] na pohyb přímočarý. Právě na tuto ovládací hřídel se instalují motorové pohony.



Obrázek 3: Detailní pohled na kontakt nožového odpojovače. [1] pevný kontakt, [2] pohyblivé kontakty (nože), [3] distanční vložka, [4] šipky ukazují směr působení tlakové síly vyvolané pružinami (na obrázku pouze názorně naznačeny), [5] detail prolisu na kontaktu

### 1.2.1 Konstrukční materiály

Důležitým požadavkem na konstrukci odpojovače je pevnost a tuhost nosného systému. Pokud by docházelo k ohybu nosného rámu, nemusela by styčná plocha a síla kontaktu být dostačující a přechodový odpor by značně vzrostl. Poté by došlo vlivem průchodu proudu právě přes tento kontakt k silnému ohřevu a možnosti poškození celého přístroje. Případně by nešlo vůbec rozpojit (nikoliv vlivem svaření, ale mechanického tření) či spojit obvod. Tuhosti se dosahuje použitím vhodného kvalitního materiálu. Nejčastěji se používá pozinkovaná ocel, která je navíc odolná proti korozi. Případně lze tuhosti docílit také použitím výztuh.

Nejčastějším materiálem proudovodné dráhy bývá postříbřená elektrovodná měď (tedy měď s čistotou 99.9%). Elektrovodný hliník se téměř nepoužívá. Není to z důvodu horších elektrických vlastností, ale hlavně mechanických vlastností. Měď je až třikrát tvrdší a pevnější, odolává tedy mnohem snáze mechanickým účinkům nejen elektrodynamických sil při průchodu zkratového proudu, ale také samotnému procesu spínání z mechanického hlediska (například pohyb nože u nožového odpojovače). Měď má také menší teplotní součinitel roztažnosti, v praxi to znamená menší deformaci díky změnám velikosti proudu pevně uchycených proudovodných částí či spojů a tedy i delší životnost.



Izolátory bývají vyráběny z keramiky, epoxidu, skla, silikonu a v poslední době velice často z kompozitních materiálů.

### 1.2.2 Výzbroj

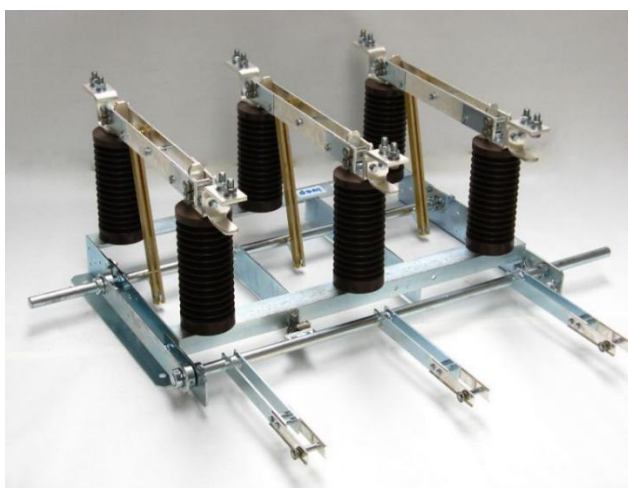
Pro usnadnění práce, pro signalizaci nebo pro dálkové ovládání bývají odpojovače vybaveny výzbrojí. Výzbroj se souhrnný název pro pomocné signální kontakty, dálkové spouště, doplňkové kryty, motorové ovládání mechanismu nebo pro ochrany. Pomocné kontakty bývají spřaženy s hřídeli nebo jsou spínány pomocí vaček na hřídeli, kterou se ovládá spínací proces. Signalizují tedy stavy sepnuto, rozepnuto a spínání. Doplňkové kryty plní funkci ochrannou. Motorové ovládání spolu s dálkovými spouštěmi umožňuje řízení přístroje z velínu.

## 1.3 Modifikace odpojovače

Pro širší rozsah použití odpojovačů, z prostorových či z ekonomických důvodů vznikly různé modifikace odpojovače.

### 1.3.1 Odpojovač s uzemňovačem

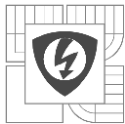
Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, nejčastěji se odpojovače používají při revizi, výměně nebo opravě zařízení. Tedy při práci na zařízení. Pro zajištění ještě větší bezpečnosti bývají odpojovače také opatřeny uzemňovacími noži. Ty, po odpojení požadované části obvodu, tuto část ještě uzemní. Uzemňovači bývají opatřeny nejčastěji kontakty vypínané části, v některých případech kontakty obou částí přístroje. Pro zajištění správného chodu musí být ovládací prvky jednotlivých částí navzájem blokovány, nesmí totiž dojít k sepnutí uzemňovače v době, kdy je sepnut odpojovač. Při zapínání odpojovače již musí být odpojen uzemňovač.



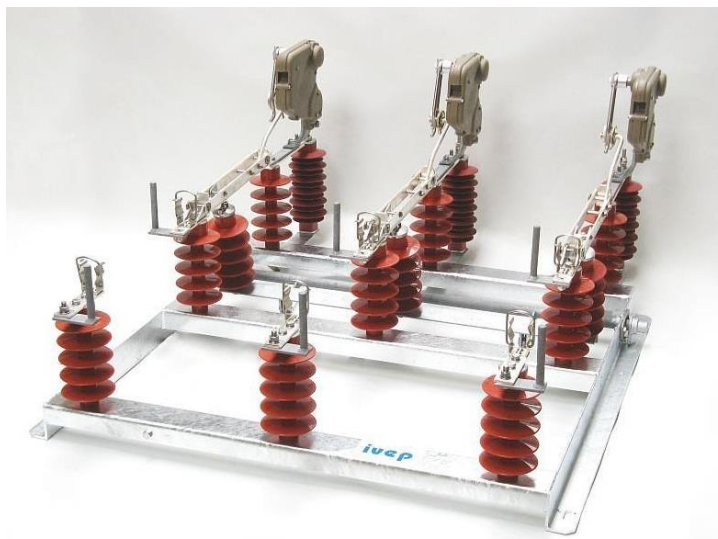
Obrázek 4: Odpojovač s jedním uzemňovačem IVEP QAKZ [1]

### 1.3.2 Odpínač

Schopnost vypínat provozní proudy a viditelně rozdělit obvod v sobě skrývá odpínač. Jedná se v podstatě o odpojovač s deionizačním zařízením. Tedy kombinace vypínače a odpojovače. Odpínače bývají nejčastěji vybaveny jednoduchým pružinovým zhášecím mechanismem,



máloolejovou či vakuovou zhášecí komorou. Jejich výhodou je, jak z popisu vyplývá, možnost zapojení bez dodatečného vypínače v sérii.



Obrázek 5: Odpínač s pojistkovým spodkem IVEP FLESP [1]

### 1.3.3 Odpojovač s pojistkovým spodkem

Odpojovače s pojistkovým spodkem lze ještě rozdělit do dvou podskupin. Jedna z nich je běžnější a je to ta, kdy je pojistkový spodek umístěn za odpojovačem, případně za odpínačem (viz. Obrázek 4). Druhou skupinou je varianta, kdy část pojistkového spodku tvoří pohyblivý kontakt a část pevné kontakty. Proudovodnou drahou je tedy samotná pojistka.

### 1.3.4 Přepojovač

Zvláštním případem je přepojovač. Jedná se o odpojovač, který však nespíná jeden obvod, ale přepíná mezi dvěma a více obvody.

## 1.4 Zkoušky odpojovače

Odpojovač, jako každý jiný elektrický přístroj, musí vyhovět všem typovým zkouškám dle normy ČSN EN 62271-1. Součástí těchto zkoušek je také oteplovací zkouška. Ta spočívá v tom, že přístrojem protéká jmenovitý proud (tedy nejvyšší proud, který může zařízením trvale protékat) a zároveň se měří jeho teplota. Průchodem tohoto proudu se přístroj zahřívá. Zkouška končí dosažením ustálené teploty. Tedy v okamžiku, kdy již oteplení nepřesáhne za 1 hodinu 1 K. Právě při oteplovací zkoušce je, v další kapitole podrobněji popsány, problematický jev nejsnáze zjištělný. Mezi další zkoušky patří zkoušky elektrické pevnosti izolace (zkouška impulzním a střídavým výdržným napětím), zkratové, spínací a také mechanické zkoušky. Součástí typové zkoušky je také měření elektrického odporu přístroje.

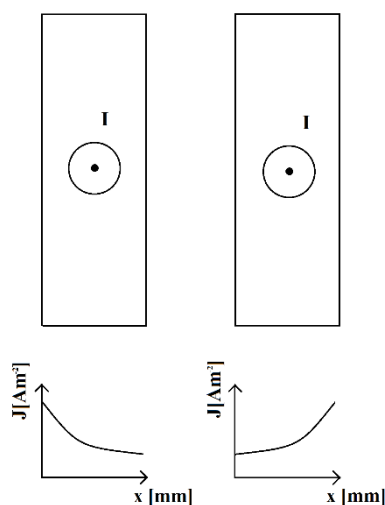


## 2 POPIS PROBLÉMU, DŮSLEDKY

U daného odpojovače se šesti noži na pól dochází při provozu k vyššímu ohřevu krajních nožů. To je pravděpodobně způsobeno Jevem blízkosti, jehož vlivem dochází k vytlačení proudové hustoty z prostředních do krajních nožů. Ty jsou tedy průchodem vyššího proudu více zahřívány. Dalším jevem, který způsobuje vytlačení proudové hustoty do stran, je Povrchový jev (známější pod anglickým názvem Skin Effect). Rozměry proudovodné dráhy zkoumaného odpojovače však nejsou tak velké, aby při síťové frekvenci 50 Hz docházelo k poměrně zratelnému vytlačení proudové hustoty vůči vlivu Jevu blízkosti.

### 2.1 Jev blízkosti (Proximity Effect)

Tento jev, anglicky Proximity Effect, vzniká ve vodičích protékanými střídavým proudem a umístěnými blízko sebe. Jako příklad je zvolen jednoduchý kontaktní nůž odpojovače tvořen dvěma paralelními vodiči obdélníkového průřezu.



Obrázek 6: Zobrazení rozložení proudové hustoty ovlivněné Jevem blízkosti v řezu 1 pólu nožového kontaktu odpojovače tvořeného dvěma paralelními

Oběma vodiči protéká stejně velký proud stejným směrem. Proud v jednom z vodičů vytvoří magnetické pole, jehož siločáry mají směr určený dle pravidla pravé ruky. Toto pole na základě Faradayova indukčního zákona indukuje napětí, a to následně způsobí podélné vířivé proudy v druhém vodiči, které tvoří smyčky. Směr protékání těchto proudů je shodný se směrem protékání „hlavního“ proudu na odlehlých stranách vodičů. Naopak na stranách přilehlých, je směr proudu opačný. Ve skutečnosti však nožem protéká pouze jeden proud, který je v každém místě roven součtu těchto proudů. Na stranách přilehlých je tedy nižší proudová hustota způsobena právě součtem těchto proti sobě tekoucích dílčích proudů a opačně. Stejně tak ovlivňuje druhý vodič první. Vytlačování proudu se projevuje jako zmenšování efektivního průřezu, tedy zvětšování



elektrického odporu vodiče. Na základě této skutečnosti se vliv Jevu blízkosti promítá do výpočtu elektrického odporu přiřazením koeficientu, nejčastěji  $k_b$ , kde se tímto koeficientem výsledná hodnota násobí. Dosahuje tedy hodnoty větší než 1.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot k_b [\Omega, \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2, -] \quad (2.1)$$

Pokud se vedle sebe nachází tři vodiče, kterými protéká proud stejným směrem, je prostřední nůž protékán proudem s nejnižší proudovou hustotou. Je to způsobeno také tímto jevem, kdy spolu interagují všechny tři vodiče. Magnetické pole, které vytváří krajní vodiče způsobí, za předpokladu, že se prostřední nachází uprostřed vzájemné vzdálenosti, rovnoměrné vytlačení proudové hustoty právě do krajních vodičů.

Pro názorný příklad jsou uvedeny výsledky oteplovací zkoušky trojnožového odpojovače IVEP QAKZ 52.2500. V následující tabulce jsou uvedeny teploty na konci zkoušky (ustálení nastalo v čase 6,5 h).

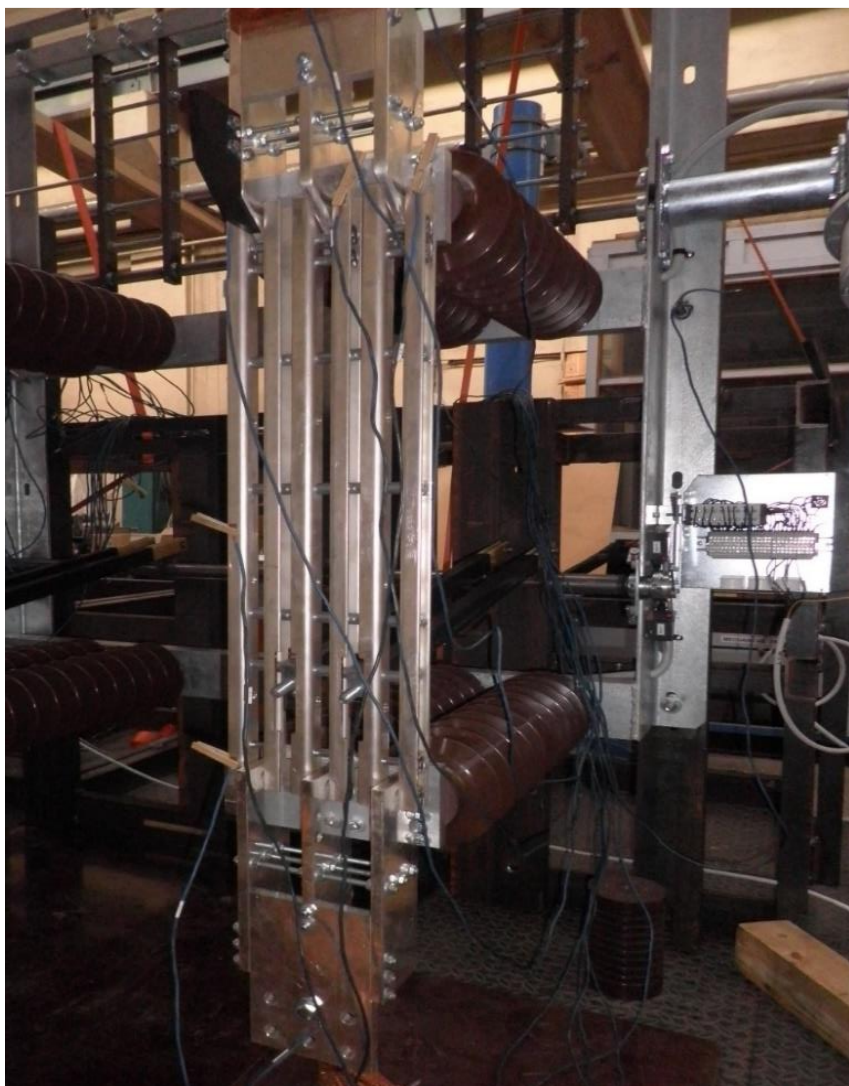
Tabulka 1: Výsledné teploty oteplovací zkoušky odpojovače IVEP QAKZ 52.2500,  $t = 6,5 \text{ h}$

	<b>I = 2500 A, <math>\vartheta_{\text{okolí}} = 16,9 \text{ }^\circ\text{C}</math></b>	<b>Fáze U</b>	<b>Fáze V</b>	<b>Fáze W</b>
	Pozice termočlánku	$\vartheta \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\vartheta \text{ [}^\circ\text{C]}$	$\vartheta \text{ [}^\circ\text{C]}$
<b>1.</b>	1 m od připojovacího praporec	39,8	43,9	41,5
<b>2.</b>	Horní připojovací praporec	44,3	36,0	38,8
<b>3.</b>	Horní kontakt levý	39,8	36,7	43,0
<b>4.</b>	Horní kontakt prostřední	36,0	33,0	33,2
<b>5.</b>	Horní kontakt pravý	43,5	37,1	36,7
<b>6.</b>	Střed nože vlevo	45,4	40,2	39,1
<b>7.</b>	Dolní kontakt vlevo	47,9	41,3	42,3
<b>8.</b>	Dolní připojovací praporec	56,7	45,5	49,5
<b>9.</b>	1 m od připojovacího praporec	68,8	43,7	49,1

Pro popisovaný jev jsou nejdůležitější řádky číslo 4., 5. a 6. Tedy každý ze tří kontaktů. U každého pólu odpojovače je prostřední kontakt o více, než  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  chladnější, než okolní. Tento fakt je ještě umocněn tím, že jednotlivé kontakty jsou součástí jednoho masivu, dochází tedy k velice



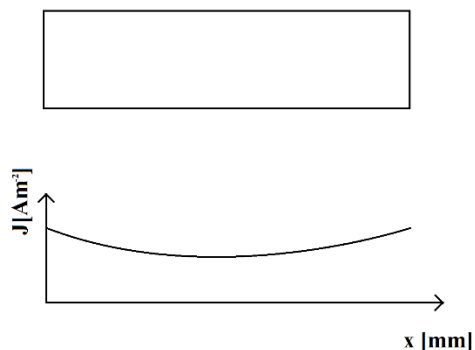
dobrému vedení tepla. I přes tuto skutečnost jsou teplotní rozdíly značné. Pokud by teplota byla měřena přímo na noži, rozdíly teplot by byly ještě vyšší.



Obrázek 7: Oteplovací zkouška odpojovače IVEP QAKZ 52.2500

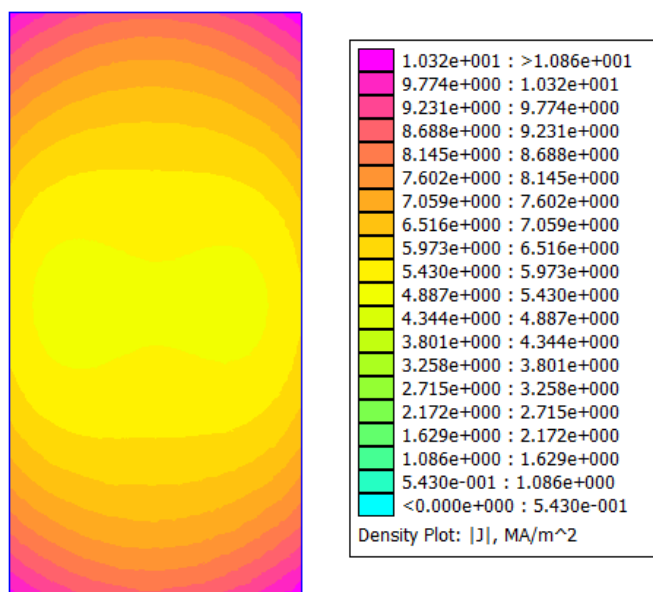
## 2.2 Povrchový jev (Skin Effect)

Tento jev také nastává u vodičů protékáných střídavým proudem. Princip vzniku je velice podobný jako u Jevu blízkosti, jedná se totiž o stejný jev, ale magnetické pole vytvářené vodičem ovlivňuje pouze tento vodič. Protékající proud vytváří magnetické pole. To opět na základě Faradayova indukčního zákona indukuje napětí, díky tomu vzniknou uvnitř vodiče vířivé proudy, které tvoří smyčky. Ty mají ve středu vodiče směr opačný směru protékání proudu, který magnetické pole vytváří. To znamená, že ve středu vodiče se tyto proudy odečítají. Na okrajích vodiče mají proudy směr shodný, a tedy se sčítají. To má za následek zvýšení proudové hustoty na okrajích vodiče.



Obrázek 8: Rozložení proudové hustoty ovlivněné Povrchovým jevem ve vodiči obdélníkového průřezu

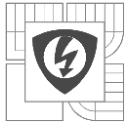
Pro názorný příklad je přiložen výsledek simulace v programu FEMM protékání proudu o velikosti 5000 A o frekvenci 50 Hz měděným obdélníkovým vodičem o rozměrech 40 x 20 mm.



Obrázek 9: Výsledek simulace rozložení proudové hustoty vlivem Povrchového jevu. Měděným vodičem o rozměrech 20 x 40 mm protéká proud  $I = 5000$  A o frekvenci  $f = 50$  Hz

Důležitým parametrem u Povrchového jevu je hloubka vniku. Ta nám udává, v jaké vzdálenosti od okraje (hloubce) vodiče poklesne amplituda proudové hustoty na velikost  $1/e$  (zhruba na 37 %). Pro měděné vodiče a frekvenci 50 Hz je hloubka vniku rovna  $\delta_{Cu} = 9,192$  mm. V praxi to znamená, že nemá smysl vyrábět a používat vodiče o charakteristických rozměrech větších, jak  $2 \cdot \delta_{Cu}$ , tedy 18,384 mm. Lépe je použít více vodičů o menších rozměrech. Právě proto jsou nejen odpojovače na vysoké proudy konstruovány jako vícenožové.





Tento jev se také projevuje zmenšováním efektivního průřezu, tedy zvětšováním elektrického odporu vodiče. Do výpočtu se promítá přiřazením koeficientu  $k_s$ . Koeficient dosahuje hodnoty vyšší, než 1.

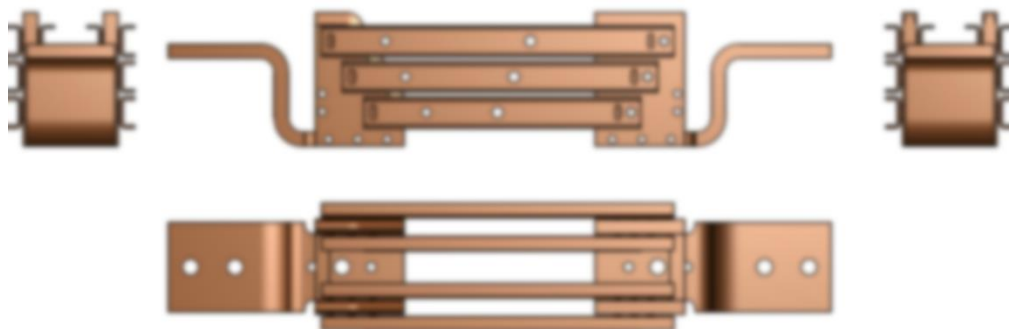
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot k_s [\Omega, \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2, -] \quad (2.2)$$

Při uvažování vlivu Povrchového jevu i Jevu blízkosti se do výpočtu elektrického odporu přiřadí oba koeficienty. Vztah tak nabere následující tvar:

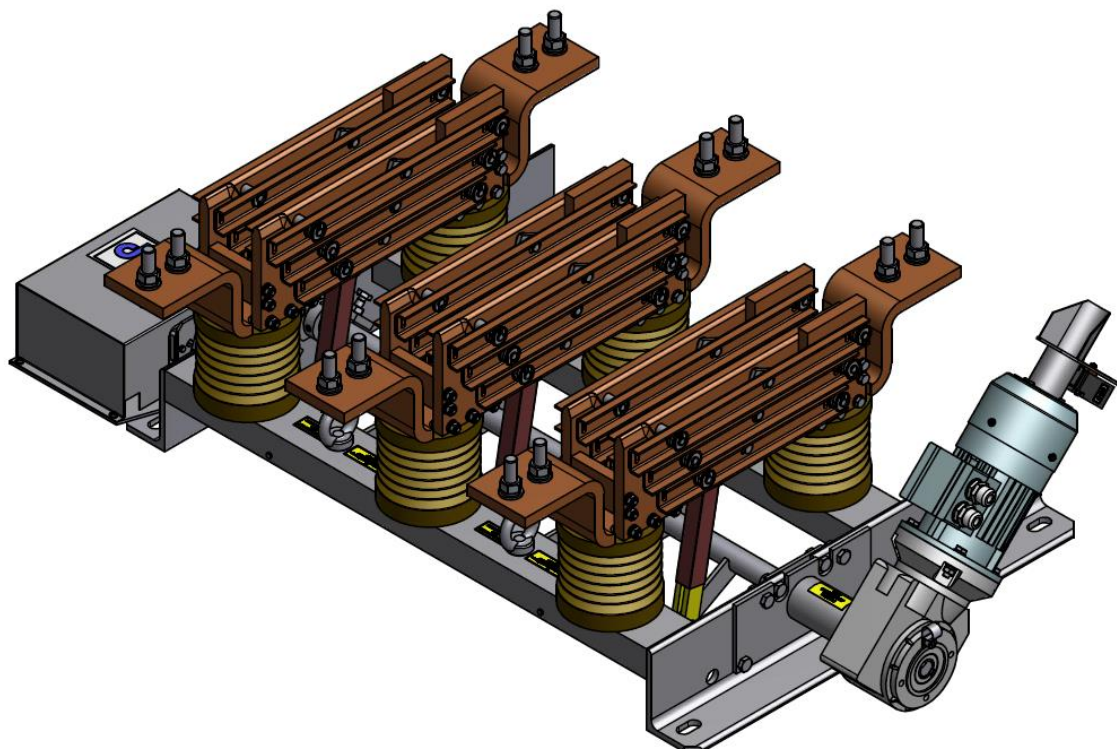
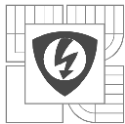
$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot k_s \cdot k_p [\Omega, \Omega\text{m}, \text{m}, \text{m}^2, -, -] \quad (2.3)$$

## 2.3 Konkrétní situace

Přístroj vybraný pro optimalizaci v této práci je odpojovač IVEP QAK 12.3150. Jedná se o vnitřní vysokonapěťový odpojovač bez uzemňovače v trojpólovém provedení s šesti noži na jeden pól, z nichž každý je tvořen dvěma paralelními noži. Celá proudovodná dráha je vyrobena z postříbřené elektrovedné mědi, pro zajištění co nejnižšího úbytku napětí na přístroji. Odpojovač je konstruován na napěťovou hladinu 12 kV. Tuto řadu odpojovačů lze vyrobit také v jiných napěťových hladinách v rozsahu 1,2 kV až 72 kV. Také hodnoty jmenovitého proudu lze volit dle objednávky v rozsahu 400 A až 160 kA. Jmenovitý proud tohoto konkrétního odpojovače je 3150 A. Pohon je zajištěn elektromotorem s dálkovou spouští a úhlovou převodovkou, která je napojena na ovládací hřídel. Hřídel motoru je na druhé straně vybavena šestihranem, na který se v případě potřeby nasune manipulační tyč a přístroj může být ovládán ručně. Stává se tak v případech výpadku proudu nebo při poškození dálkového ovládacího. Signalizaci zajišťují dva koncové spínače, které jsou umístěny na vačce na druhém konci ovládací hřídele. Každý signalizuje jeden ze statických stavů a obsahuje 1 kontakt spínací a 1 rozpínací. Dle požadavku lze ještě přístroj vybavit až 24 pomocnými kontakty.



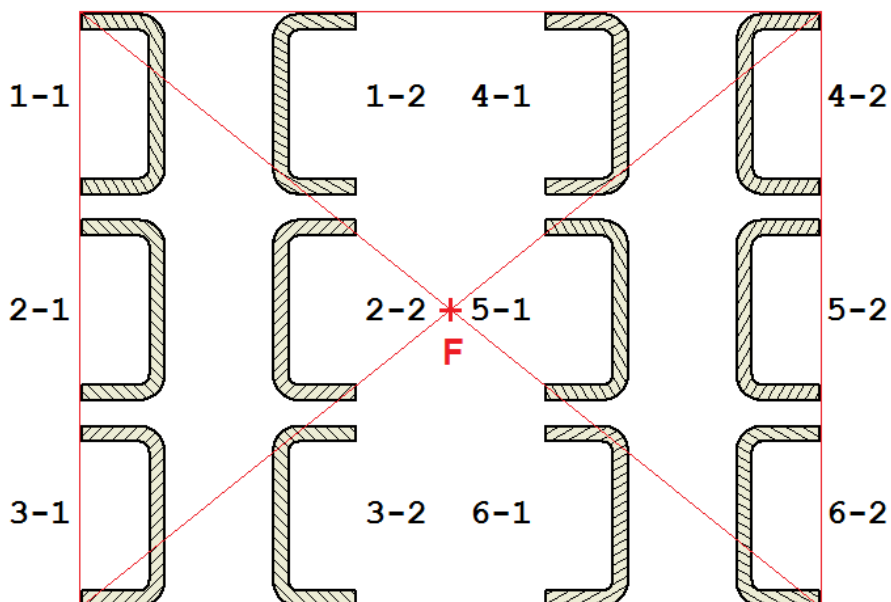
Obrázek 10: Nárys, půdorys a oba bokorysy proudovodné dráhy odpojovače IVEP QAK 12.3150



Obrázek 11: Celkový pohled na odpojovač IVEP QAK 12.3150

Dále se bude práce zaměřovat pouze na jeden pól odpojovače. Na následujícím obrázku [Obrázek 12: Řez noži jednoho pólu odpojovače IVEP QAK 12.3150. Červenou barvou je zobrazen obrys fiktivního vodiče a fiktivní střed F.] je zobrazen řez proudovodnou dráhou, pro snadnější popis problému jsou jednotlivé nože i jejich dílčí nože očíslovány. Průřez každého nože je 173,99 mm<sup>2</sup>. Při průchodu jmenovitého proudu dochází k vyššímu zahřívání obou nožů číslo 1, 4, 3 a 6. K ještě vyššímu ohřevu dochází u nožů 1-1, 4-2, 3-1 a 6-2, protože právě tyto jsou, teoreticky, namáhány nejvyšší proudovou hustotou. Je to způsobeno Jevem blízkosti, kdy jsou proudy jednotlivými noži vytlačovány právě do nožů, které jsou, jednoduše řečeno, nejdále od všech ostatních. V každém z okrajových nožů, je pravděpodobně ještě více namáhána ta část nože, která je nejdále fiktivnímu středu F proudovodné dráhy. Pokud by proudovodnou dráhu tvořil jeden masivní vodič, jehož rozměry by byly shodné s vnějšími rozměry všech dílčích drah, byl by jeho střed právě fiktivním středem proudovodné dráhy. Kolem tohoto středu je proud rovnoměrně vytlačován do okrajových částí. Naopak nože 2 a 5 jsou namáhány nejnižší proudovou hustotou, protože nedochází k tak vysokému ohřevu. Dokonce by se dalo uvažovat o tom, že nože 2-2 a 5-1 by mohly být, z pohledu vedení jmenovitého proudu, zcela vynechány. Tato možnost by však přinesla problém v oblasti zkratových proudů. Díky tomu, že jsou dva nože pevném kontaktu naproti sobě, jsou silami vzniklými průchodem zkratového proudu přitahovány k sobě a nedojde ke snížení přitlačné síly, dokonce dojde, díky této geometrii, k jejímu zvýšení. Pokud by však byly nože 2-2 a 5-1 odstraněny, docházelo by u nožů 2-1 a 5-2 k odskoku.

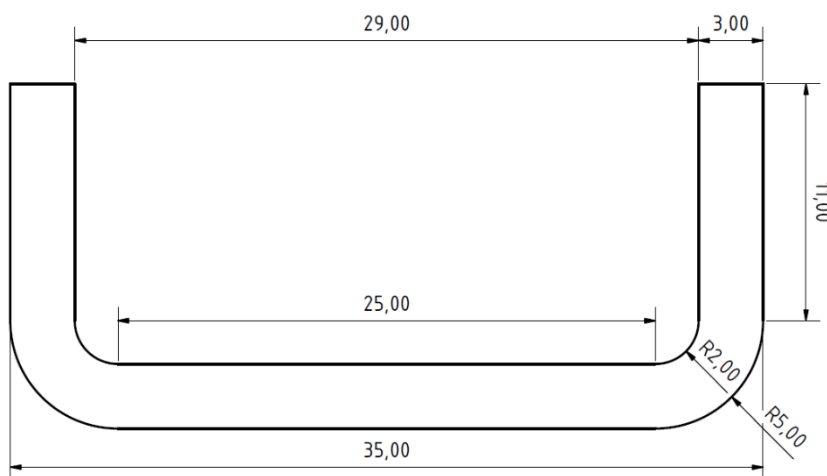
Protože jsou rozměry jednotlivých nožů relativně malé – tloušťka nože je 3 mm, bude Povrchový jev pravděpodobně zanedbatelný (viz kapitola 2.2).



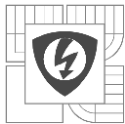
Obrázek 12: Řez noži jednoho pólu odpojovače IVEP QAK 12.3150. Červenou barvou je zobrazen obrys fiktivního vodiče a fiktivní střed F.

Tabulka 2: Elektrický odpor každého nože odpojovače a průřez nože

Číslo nože	R [ $\mu\Omega$ ]
1, 4	19,76
2, 5	17,64
3, 6	15,52
Celek	1,46
<b>S1 = 173,99 mm<sup>2</sup></b>	



Obrázek 13: Jednotlivé rozměry každého nože odpojovače

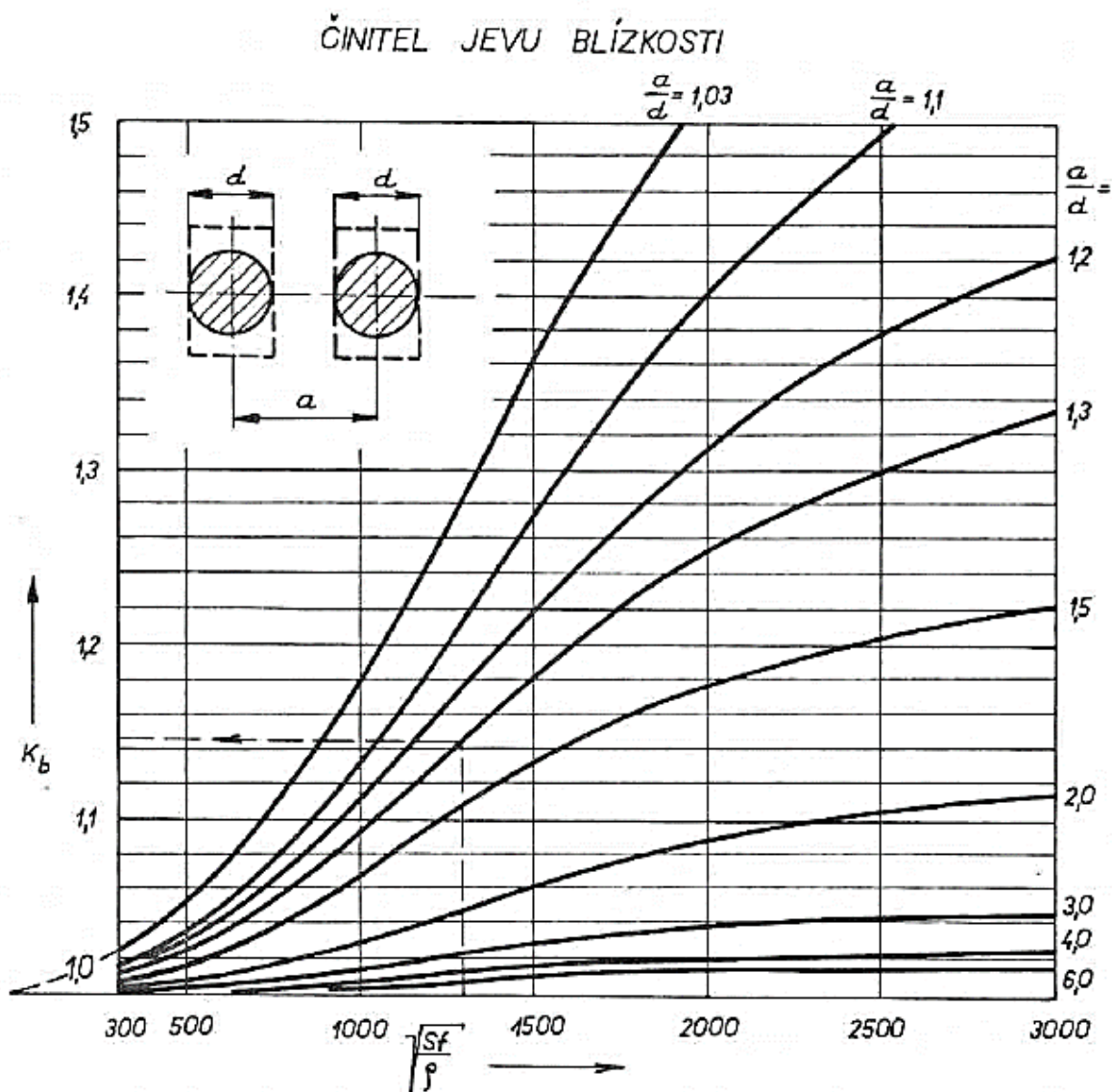


### 3 VÝPOČET A SIMULACE STÁVAJÍCÍHO STAVU

Jako parametr, který bude během optimalizace sledován, byl vybrán Koeficient vlivu Jevu blízkosti. Kapitola se tedy zaměřuje na jeho výpočet jak analytickou cestou, tak metodou konečných prvků v různých prostředích.

#### 3.1 Analytický výpočet

Analytické vyjádření a výpočet činitele jevu blízkosti je pracné a obtížné. Proto bývá zpravidla vynášen graficky. Ze znalosti rozměrů vodičů a jejich vzájemných vzdáleností se určí poměr, pomocí kterého je z vynesené závislosti odečten koeficient  $k_b$ .



Obrázek 14: Pomůcka pro grafické určení velikosti činitele Jevu blízkosti. [6]



Na horizontální ose je vynesena charakteristická veličina zohledňující průřez vodičů –  $S$ , frekvenci proudu –  $f$  a materiál –  $\rho$ . Na vertikální je pak vynesena hodnota koeficientu  $k_b$ .

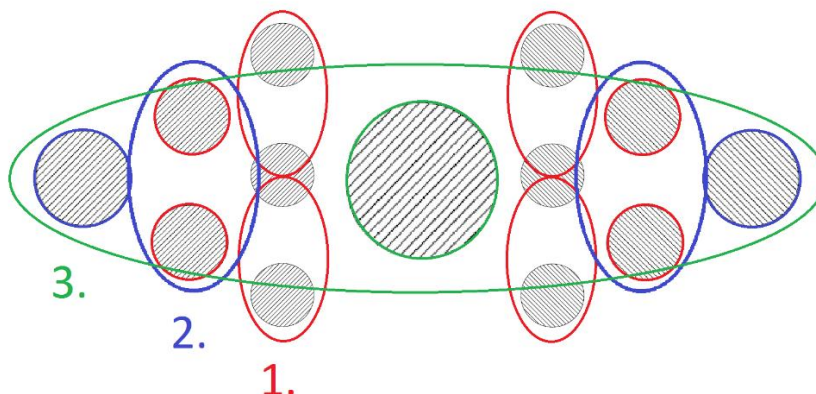
Nejprve je nutno si určit průměr ekvivalentního vodiče kruhového průřezu, který nahradí dva dílčí nože (zjednodušující předpoklad – problém se zmenší na 6 vodičů). Ten se určí ze znalosti průřezu nože a věty pro výpočet obsahu kruhu.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot S_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2 \cdot 173,99}{\pi}} = 21,05 \text{ mm} \quad (3.1)$$

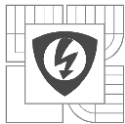
Vertikální vzdálenost středů nožů od sebe je stejná, a to 40 mm. Horizontální pak 90 mm. Vzájemný poměr  $a/d$  je poté roven:

$$\frac{a_v}{d} = \frac{40}{21,05} = 1,90 \quad (3.2)$$

Nyní je třeba určit postup výpočtu, protože grafický odečet je vynesen pouze pro dva vodiče a nikoliv pro šest. Proto bude nejdříve určen koeficient pro horní a polovinu prostředního vodiče jedné strany nožů (červená oblast). Polovina je volena z toho důvodu, že prostřední vodič vstupuje jak do výpočtu horní, tak do výpočtu dolní části. Jelikož je problém symetrický, bude tento koeficient stejný také pro dolní a polovinu prostředního vodiče. Tím vzniknou dva fiktivní vodiče s průřezem rovným jednomu a jedné polovině původního vodiče (červené vodiče) a první hodnota koeficientu. Pro tyto vodiče (modrá oblast) bude opět určen koeficient a průřez již pouze jednoho vodiče (modrý vodič), který nahradil tři nad sebou umístěné vodiče. Druhá svislá řada nožů bude přepočtena stejně. Poslední koeficient bude určen ze znalosti průřezů ekvivalentních vodičů (zelená oblast). Tímto posledním krokem vznikne jeden vodič (zelený vodič), jež v sobě zahrnuje všech 12 nožů. Výsledný koeficient bude roven součinu všech dílčích koeficientů.



Obrázek 15: Návrh metody výpočtu koeficientu  $k_b$



Nyní je třeba určit charakteristickou veličinu. Frekvence bude síťová, tedy 50 Hz, materiál nožů je měď, jeho rezistivita je tedy  $0,0169 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ . Průřez bude roven, jak bylo navrženo, jeden a půl násobku průřezu nože:

$$S_{\xi} = 1,5 \cdot 2 \cdot S_1 = 1,5 \cdot 2 \cdot 173,99 = 521,97 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho}} = \sqrt{\frac{521,97 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{0,0169 \cdot 10^{-6}}} = 1243 \quad (3.4)$$

Z grafického průběhu Koeficientu Jevu blízkosti je odečtena hodnota:

$$k_{b\check{c}} = 1,05 \quad (3.5)$$

Dále je třeba určit koeficient pro modré vodiče. Opět je spočten průřez, průměr, poměr  $a/d$  a charakteristická veličina a poté odečten koeficient:

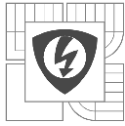
$$S_m = 2 \cdot S_{\xi} = 2 \cdot 521,97 = 1043,94 \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot S_m}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1043,94}{\pi}} = 36,46 \text{ mm} \quad (3.4)$$

$$\frac{a_v}{d_m} = \frac{40}{36,46} = 1,1 \quad (3.5)$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho}} = \sqrt{\frac{1043,94 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{0,0169 \cdot 10^{-6}}} = 1757 \quad (3.6)$$

$$k_{bm} = 1,3 \quad (3.7)$$



Posledním krokem je určení koeficientu pro zelený vodič stejným způsobem jako pro vodič modrý, pouze s tím rozdílem, že vodiče jsou vedle sebe horizontálně, jejich vzájemná vzdálenost je tedy ah:

$$S_z = 2 \cdot S_m = 2 \cdot 1043,94 = 2087,88 \text{ mm}^2 \quad (3.8)$$

$$d_z = \sqrt{\frac{4 \cdot S_z}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2087,88}{\pi}} = 51,56 \text{ mm} \quad (3.9)$$

$$\frac{a_h}{d_z} = \frac{90}{51,56} = 1,75 \quad (3.10)$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho}} = \sqrt{\frac{2087,88 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{0,0169 \cdot 10^{-6}}} = 2485 \quad (3.11)$$

$$k_{bz} = 1,15 \quad (3.12)$$

Výsledný koeficient bude roven součinu všech dílčích koeficientů:

$$k_b = k_{b\check{c}} \cdot k_{bm} \cdot k_{bz} = 1,05 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 1,57 \quad (3.13)$$

Koeficient vlivu Jevu blízkosti, zahrnující všech 12 nožů, pro pól odpojovače 1,57.

## 3.2 Simulace

Pro přesnější výsledky a pro možnost porovnání více výsledků byly simulace provedeny ve dvou různých dvourozměrných prostředích. Tyto modely však nezohledňují vliv pevných kontaktů na rozložení proudové hustoty. Právě kvůli tomuto nedostatku byla provedena také simulace v trojrozměrném prostředí.

Jedním z dvourozměrných systémů je program FEMM (Finite Element Method Magnetics), který slouží k výpočtu magnetických, elektrických a tepelných úloh metodou konečných prvků v dvourozměrném prostředí. Výhodou tohoto programu je velice snadné a přehledné ovládání, možnost importovat geometrii z CAD programů a podpora LUA skriptu. Nevýhodou je pak možnost zobrazení a výpočtu pouze předvolených veličin. Nicméně tyto veličiny jsou pro základní simulace zcela dostačující.

Druhým programem je Ansys Maxwell. Ten slouží pouze k výpočtu magnetických a elektrických problémů. Výhodou je ovšem celá škála možných proměnných a parametrů, které

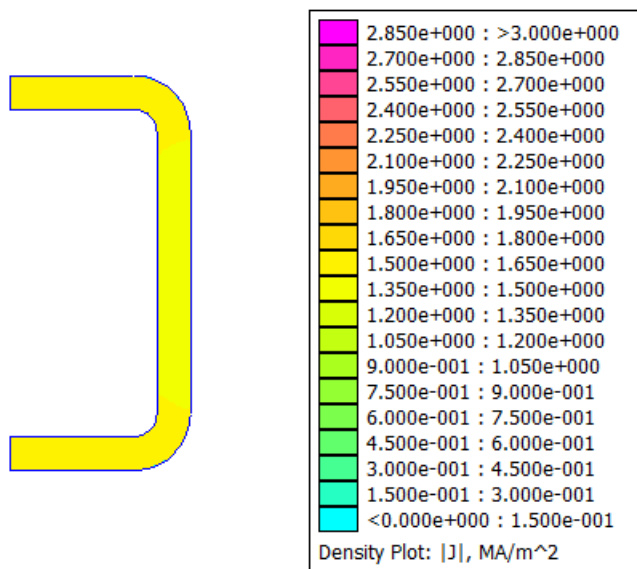


mohou vstupovat do výpočtu. Velkou výhodou je také to, že lze využít zakomponovanou kalkulačku a dopočítat si, ze znalosti vztahů, téměř jakoukoliv veličinu. Pro modelování rozložení proudové hustoty v nožích je použit 2D Maxwell. Pro modelování celé proudovodné dráhy je použit 3D Maxwell jako součást Ansys Workbench. Výhodou tohoto prostředí je možnost propojení jednotlivých modelů a parametrů mezi různými úlohami. Podpora importování geometrie a modelů z CAD je také součástí programu.

Model celé proudovodné dráhy byl zhotoven v prostředí Autodesk Inventor 2014. Pro import do 3D Maxwell byl použit formát STEP. Stejný formát byl použit pro import do 2D Maxwell. Pouze místo celého modelu, byl použit řez noži odpojovače. Tento řez, ale ve formátu DXF byl použit pro import do programu FEMM.

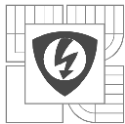
### 3.2.1 Ověření možnosti zanedbání Povrchového jevu simulací

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, je Povrchový jev pravděpodobně zanedbatelný. Je to díky relativně malým rozměrům nožů, jejichž tloušťka je pouze 3 mm. Aby byl tento předpoklad ověřen, proběhla kontrolní simulace, která potvrdila, že Povrchový jev je skutečně zanedbatelný. Z výsledku simulace, lze vyčíst, že rozložení proudové hustoty v jednom dílčím noži je téměř rovnoměrné. Odchylky jsou pouze v jednotkách procent.



Obrázek 16: Výsledek simulace, která potvrdila, že Povrchový jev je v tomto případě zanedbatelný. Simulace v programu FEMM,  $I = 262,5 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$





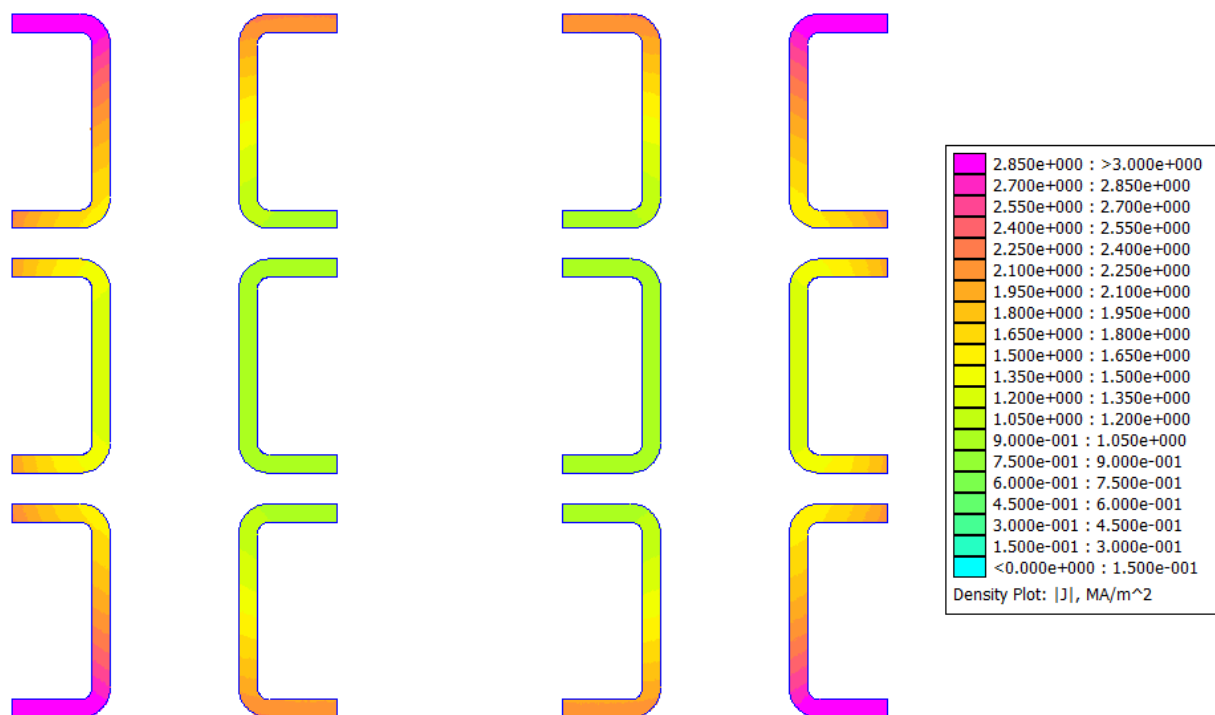
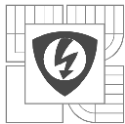
### 3.2.2 Simulace v programu FEMM

Nejdůležitější částí každé simulace je správné zadání vstupních parametrů výpočtů. Nejprve je zvolena úloha, která se bude řešit, v tomto případě to byla úloha magnetická („Magnetics Problem“). Dalším důležitým krokem, je bližší popsání problému, tedy frekvence proudu, se kterým bude počítáno, přesnost výpočtu a typ úlohy. Typem úlohy se rozumí buď rotační, která se používá pro symetrická tělesa, jako je válcový elektromagnet nebo úloha plošná, což je tento případ. U plošné úlohy je možnost zadat hloubku tělesa, jedná se tedy o jakousi simulaci třetího rozměru. S výhodou se využívá při určování momentu motorů či ztrát ve vedení. Při využití importu geometrie z CAD programů je velice důležité nastavení základní rozměrové jednotky. Tato jednotka musí být shodná se základní jednotkou CAD programu. Pokud bychom výkres vytvořili nebo převzali v palcích či centimetrech a ve FEMMu nastavili základní jednotku milimetry, odpovídal by jeden palec či centimetr ve skutečnosti jednomu milimetru v simulaci. Což by zcela změnilo výsledky.

Po importování geometrie je třeba nastavit okrajové podmínky výpočtu. Tedy uzavření modelu do konečného prostoru. V tomto případě bylo zvoleno kruhové okolní vzduchové prostředí. Rozměry okolního prostředí musí být dostatečně velké, aby nedocházelo k ovlivňování výsledků. Je to proto, že na hranici okolního prostředí jsou nastaveny okrajové podmínky a ty jsou po celou dobu výpočtu konstantní. Nejsnáze se tento problém popisuje na teplotním výpočtu. Pokud by byla nastavena okrajová podmínka, v tomto případě teplota okolí na teplotu 30 °C a hranice okolí blízko topnému tělesu, nedocházelo by k oteplování tělesa, i když by jeho výkon byl dostatečný. Je to proto, že okolí má pořád, díky okrajové podmínce, teplotu 30 °C a tím těleso ochlazuje. Pokud by bylo okolí dostatečně daleko, byl by jeho vliv zanedbatelný. Ovšem obecně nelze říci, co je dostatečně daleko, proto musí být pro každou úlohu okolí posouzeno individuálně. V případě odpojovače bylo nastaveno okolí o rozměrech 200 % vnějšího rozměru v každém směru.

Poté je třeba přiřadit materiály. Jak už bylo zmíněno, je okolnímu prostředí přiřazen vzduch. Vodičům je třeba přiřadit elektrovodnou měď.

Dalším parametrem je protékající proud. Pro tuto úlohu je určen „paralelní proud“. Ten si lze představit, tak, že vodiče jsou na začátku a na konci dokonale zkratovány a proud vtéká právě do tohoto zkratu. Do jednotlivých vodičů se poté rozdělí dle fyzikálních zákonů a jevů, tedy i Jevu blízkosti.



Obrázek 17: Simulace skutečného stavu rozložení proudové hustoty odpojovače IVEP QAK 12.3150 v programu FEMM,  $I = 3150 \text{ A}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$

Rozložení proudové hustoty je zobrazeno na Obrázku 11. Z této simulace je velice názorně vidět, jak je proudová hustota vytlačována směrem ven od fiktivního středu. Také potvrzuje teoretickou domněnku, že hodnota proudové hustoty v nožích 1,4,3 a 6 je vyšší, než u nožů 2 a 5. A ještě vyšší proudová hustota je opravdu v nožích 1-1, 4-2, 3-1 a 6-2. Nejvyšší proudová hustota je ještě v okrajových částech těchto nožů. Naopak nejnižší proudová hustota je v nožích 2-2 a 5-1, a. To potvrzuje domněnku, že tyto nože jsou z hlediska vedení proudu zanedbatelné.

Z rozložení proudové hustoty lze předpokládat také rozložení proudu jednotlivými noži. Ze znalosti proudové hustoty a plochy nože lze vypočítat celkový protékající proud. Program FEMM je vybaven funkcí „Block Integrals“ která umožňuje rychlé spočtení přednastavených veličin. Proud vybraným objektem je jedna z nich. Následující tabulka zobrazuje velikosti proudů v každém z nožů. Další hodnotou zobrazenou v tabulce jsou ztráty, v tomto případě ohmické a hodnota odporu daného nože.



Tabulka 3: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Simulace v programu FEMM. Pro názornost je zobrazena také původní hodnota elektrického odporu každého nože (bez vlivu Jevu blízkosti)

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]	R <sub>pův</sub> [ $\mu\Omega$ ]
1-1	385,22	3,69	24,87	19,76
1-2	247,71	1,61	26,20	19,76
2-1	247,64	1,98	32,24	17,64
2-2	86,27	0,49	65,62	17,64
3-1	381,85	2,84	19,50	15,52
3-2	244,31	1,23	20,59	15,52
4-1	244,20	1,57	26,25	19,76
4-2	375,75	3,50	24,82	19,76
5-1	84,12	0,47	66,75	17,64
5-2	239,55	1,12	19,59	17,64
6-1	240,95	1,98	34,06	15,52
6-2	372,45	2,70	19,46	15,52
Celek	3150,00	23,18	2,22	1,46
Průměrná odchylna	77,54			
Rozdíl maxima a minima	301,10			

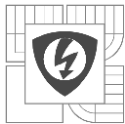
Rozdíly ve velikostech proudu v jednotlivých nožích jsou značné. V noži 1-1 protéká proud o velikosti 385,22 A a v noži 5-1 protéká proud 84,12 A. To je o více, než 300 A méně. Jinými slovy nejvíce namáhanými noži protéká o 360 % větší proud, než nejméně namáhanými. Tento rozdíl pravděpodobně nejlépe ukazuje, jak vysoce je rozložení proudů nerovnoměrné.

Ohmické, neboli tepelné ztráty na proudovodné dráze odpojovače stanovila simulace na 23,18 W.

Protože se vliv Jevu blízkosti projevuje změnou efektivního průřezu a tedy i elektrického odporu, je možno ze znalosti původní hodnoty elektrického odporu a hodnoty aktuální určit koeficient  $k_b$ . Lze jej určit pro každý nůž zvlášť nebo také pro všechny nože jako celek. Povrchový jev je zanedbán.

$$k_b = \frac{R}{R_{pův}} = \frac{2,22}{1,46} = 1,52 \quad (3.14)$$

Hodnota koeficientu je téměř shodná s analyticky určenou hodnotou. To potvrzuje, že zvolená metoda výpočtu byla správná a výsledek v sobě opravdu zahrnuje vliv všech 12 dílčích nožů.

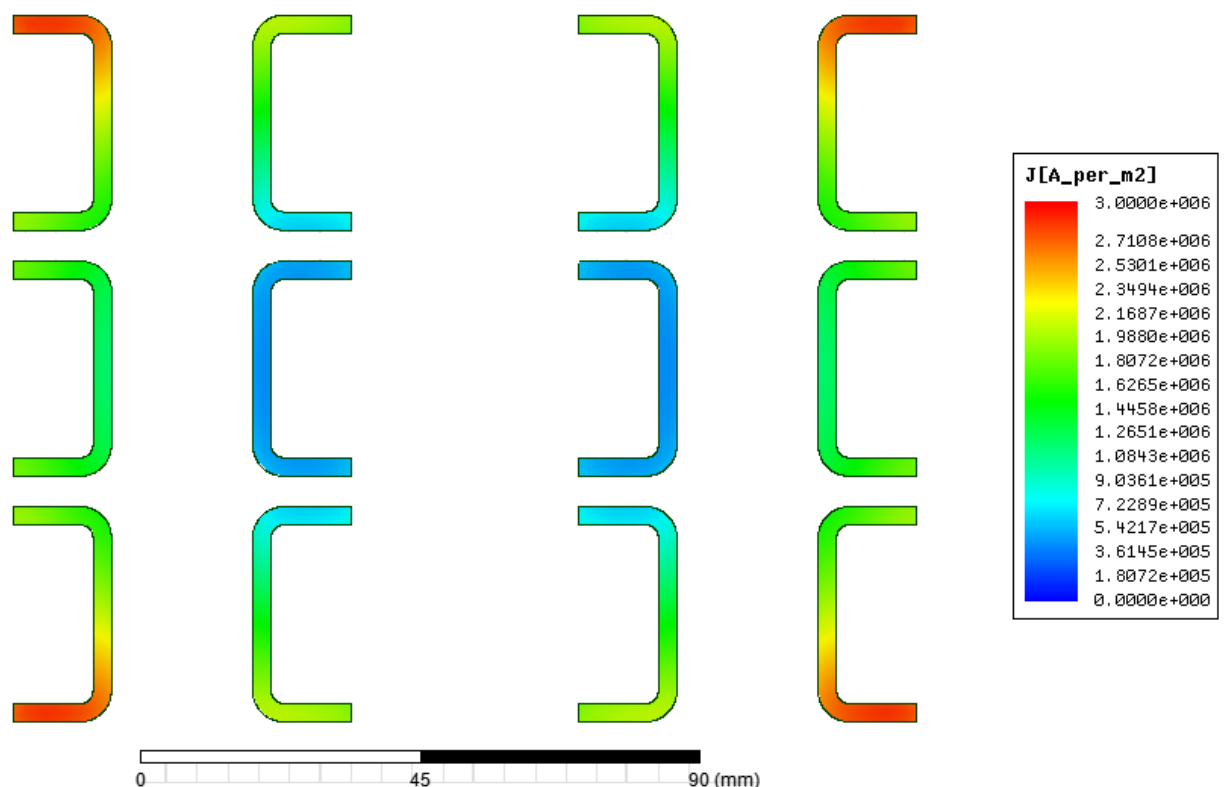


### 3.2.3 Simulace v programu Ansys Maxwell 2D

Stejně jako v programu FEMM je vhodné a správné nastavení parametrů výpočtů nejdůležitější částí. Nejprve je zvolen typ úlohy, v tomto případě se jedná magnetickou úlohu s vířivými proudy (Eddy Current). Také je zde možnost výběru souřadnicového systému stejně jako u FEMMu, tedy plošný nebo rotační. Před importem geometrie je třeba také nastavit základní jednotky tak, aby byly shodné s rýsovacím softwarem, ve kterém je model nakreslen.

Po importu geometrie je třeba uzavřít model do konečného prostoru a nastavit okrajové podmínky. Rozměry prostoru jsou zvoleny opět 200 % vnějšího rozměru v každém směru. Jako okrajová podmínka je s výhodou použita podmínka „Balloon“, tato nám zajistí, že za hranicí konečného prostoru nic neovlivňuje výpočet.

Dále, v záložce buzení, je třeba nastavit protékající proud. Opět je zvolena možnost „Parelní proud“. Zde se zadá celková hodnota proudu, která má danými objekty protékat a ten se na základě fyzikálních zákonů a jevu rozloží do jednotlivých částí proudovodné dráhy.



Obrázek 18: Simulace skutečného stavu rozložení proudové hustoty odpojovače IVEP QAK 12.3150 v programu Ansys Maxwell 2D,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

Z výsledku lze vidět, že proudová hustota je skutečně vytlačována rovnoměrně směrem ven z fiktivního středu F. Také potvrzuje domněnku, že krajní nože, tedy nože 1-1, 4-2, 3-1 a 6-2 jsou



namáhány proudem nejvíce a prostřední nože 2-2 a 5-1 nejméně. Maximální proudová hustota je právě na rozích krajních nožů a nejmenší ve středu prostředních nožů.

Pomocí zakomponované kalkulačky byla určena velikost proudů jednotlivými větvemi a jejich ztráty. Také byly určeny hodnoty elektrického odporu nožů a celku.

*Tabulka 4: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Simulace v programu Ansys Maxwell 2D. Pro názornost je zobrazena také původní hodnota elektrického odporu každého nože (bez vlivu Jevu blízkosti)*

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]	R <sub>pův</sub> [ $\mu\Omega$ ]
1-1	381,08	3,59	24,72	19,76
1-2	240,77	1,52	26,25	19,76
2-1	247,82	1,20	19,48	17,64
2-2	83,88	0,47	67,02	17,64
3-1	381,15	2,82	19,44	15,52
3-2	240,66	1,19	20,61	15,52
4-1	240,55	1,52	26,24	19,76
4-2	381,04	3,59	24,71	19,76
5-1	83,84	0,47	67,00	17,64
5-2	247,77	1,20	19,48	17,64
6-1	240,53	1,19	20,60	15,52
6-2	380,91	2,81	19,40	15,52
Celek	3150,00	21,58	2,14	1,46
Průměrná odchylna	79,03			
Rozdíl maxima a minima	297,31			

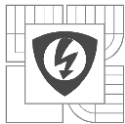
Rozložení celkového proudu je téměř shodné s předchozí simulací. Maximální proud protéká přes nůž 3-1 a to 381,15. A. Ostatními noži s největší proudovou hustotou protéká stejně velký proud, jen s rozdílem desetin Ampérů. Nejnižší proud je v noži 5-1 a to 83,84 A.

Také ztráty na jednotlivých nožích jsou téměř shodné s výsledky předchozí simulace. V tomto případě byly vypočteny 21,58 W.

Stejně jako v předchozím případě, lze ze znalosti původní hodnoty odporu proudovodné dráhy a hodnoty ovlivněné Jevem blízkosti určit koeficient  $k_b$ . Povrchový jev je opět zanedbán.

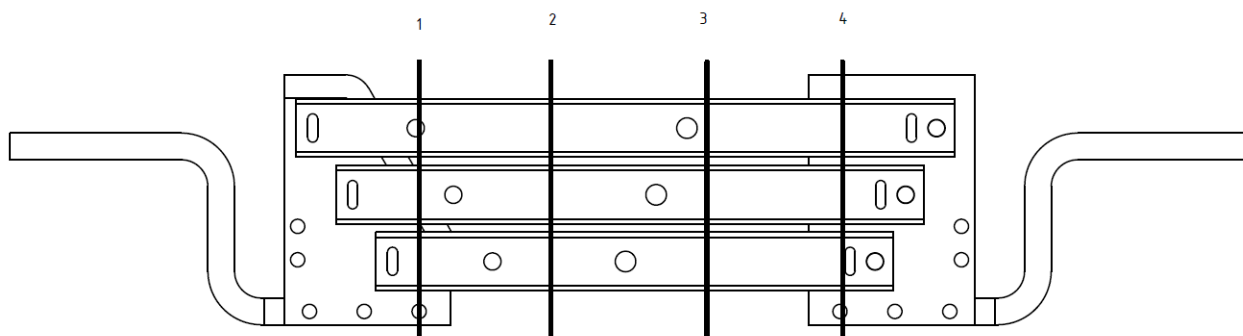
$$k_b = \frac{R}{R_{pův}} = \frac{2,14}{1,46} = 1,47 \quad (3.15)$$

Hodnota koeficientu je opět blízká hodnotě určené analytickým výpočtem a také výsledku předchozí simulace.

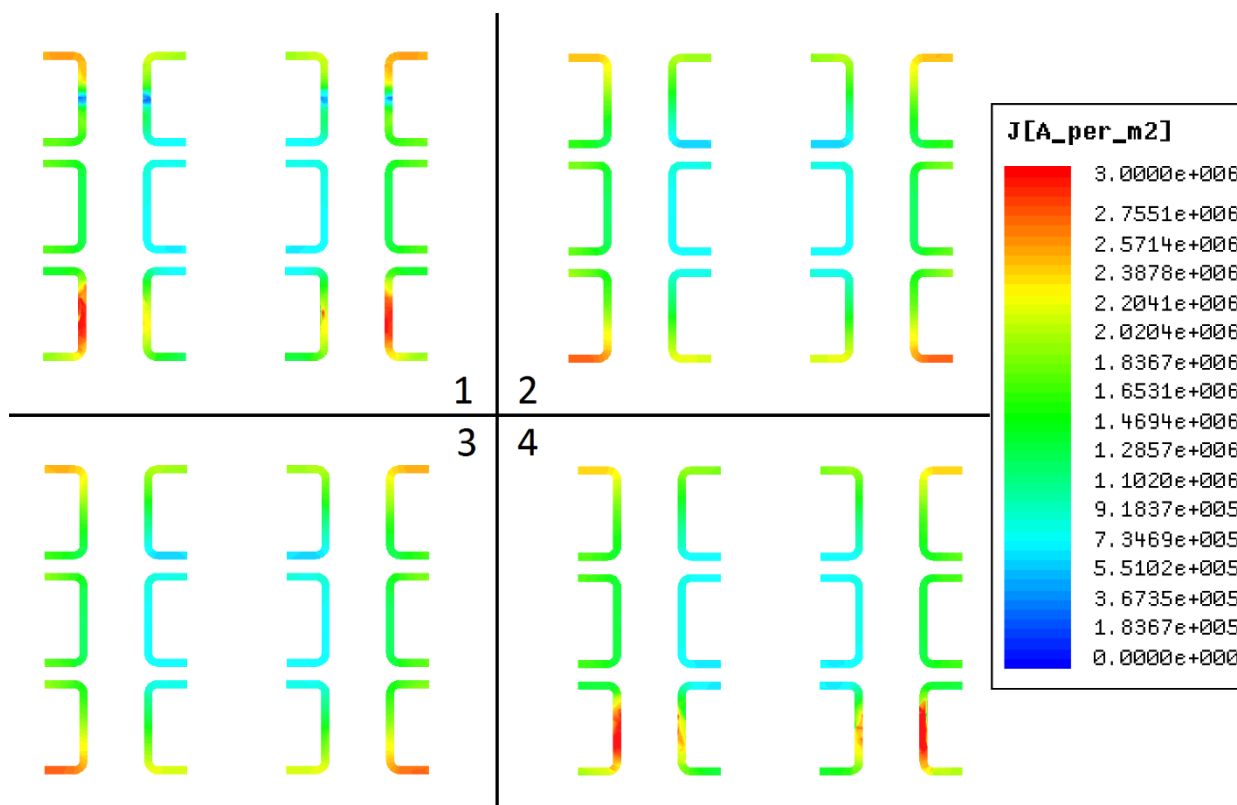


### 3.2.4 Simulace v programu Ansys Maxwell 3D

Simulace v tomto prostředí byla provedena z důvodu zjištění vlivu pevných kontaktů na rozložení proudové hustoty v nožích. Ta je zobrazena ve čtyřech místech. První z nich je 10 mm od konce pevného kontaktu směrem k přípojovacímu praporci, druhé je 30 mm od konce pevného kontaktu, ovšem směrem ke středu odpojovače. Na druhé straně jsou řezy provedeny ve stejných vzdálenostech.

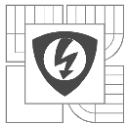


Obrázek 19: Naznačení řezů 3D modelem proudovodné dráhy



Obrázek 20: Rozložení proudové hustoty v řezech odpojovače IVEP QAK 12.3150 s ohledem na vliv pevných kontaktů. Simulace v programu Ansys Maxwell 3D,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

Z výsledků vyplývá, že tvar pevných kontaktů vliv na rozložení proudové hustoty má, ovšem jen v omezené míře. V relativně malé vzdálenosti od kontaktů je soustředěna proudová hustota



---

právě do oblasti kontaktu – středu nože. Ovšem již zhruba v trojnásobné vzdálenosti není rozložení proudové hustoty nijak ovlivněno. Rozložení je velice podobné výsledkům 2D simulací, rozdíl je pouze v tom, že dolní nože 3 a 6 jsou zatěžovány více, než horní nože 1 a 2. Je to způsobeno tím, že nože jsou v tomto 3D modelu různě dlouhé a tím pádem jsou různé i jejich elektrické odpory. Dolní nože, protože jsou nejkratší, mají nižší odpor, a tudíž jimi protéká vyšší proud. Tento problém, tedy rozdílné délky nožů, ovšem nelze v 2D simulacích řešit, a proto byly proudové hustoty vykresleny pro střední délku nožů a hodnoty ztrát, odporů a velikosti proudů dopočteny pro jednotlivé délky. Tato skutečnost však nemá žádný vliv na rozložení proudové hustoty vlivem Jevu blízkosti, ta je pouze v kratších nožích poměrně zvětšena vlivem menšího elektrického odporu.

### 3.3 Zhodnocení

Výsledky simulací lze považovat za shodné a pro optimalizaci v následujících kapitolách bude použita pouze simulace v programu FEMM. Z výsledků je patrné, že také sledování průměrné odchylky proudů a hlavně rozdíl maximálního a minimálního proudu je důležité. Oba parametry totiž mají významnou vypovídající hodnotu o nerovnoměrnosti rozložení proudů.



## 4 OVĚŘENÍ VÝPOČTU MĚŘENÍM

Pro skutečné ověření domněnky, že proud je vytlačován co nejdále od geometrického středu nožů a pro potvrzení správnosti simulací bylo provedeno ještě měření na skutečném odpojovači v prostoru zkušebny společnosti IVEP, a.s. Před samotným měřením bylo zapotřebí určit vhodnou měřicí metodu a také vyrobit měřicí přístroj, který, hlavně kvůli rozměrům, lze pro měření na tomto odpojovači použít.

### 4.1 Volba vhodné měřicí metody

Měření rozložení proudů v jednotlivých nožích je nutno měřit metodou, která nevyžaduje rozpojení měřeného obvodu a která neovlivňuje rozložení proudů. Dalším, již zmíněným, požadavkem jsou mechanické vlastnosti měřicího přístroje a jeho rozměry.

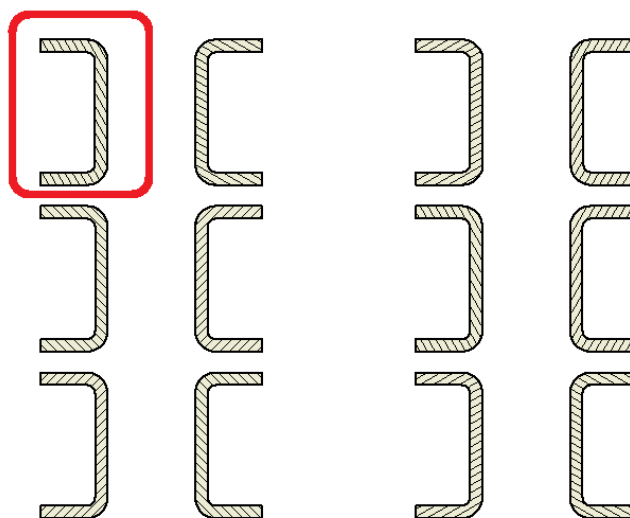
Z těchto požadavků vyplývá, že nejvhodnějším měřicím přístrojem pro toto měření je Rogowskeho cívka.

#### 4.1.1 Rogowskeho cívka

Rogowskeho cívka je cívka navinutá na nevodivém, nemagnetickém a často na ohebném jádře. Zpravidla na plastovém či gumovém. Toto jádro lze zhotovit jako otevřené a lze jej tedy navinout okolo měřeného vodiče bez nutnosti rozebírat obvod. Pokud je cívka navržena a zhotovena dobře je výsledek měření zcela nezávislý na tvaru cívky (musí však být dodrženo to, že jádro cívky tvoří uzavřenou smyčku) a také na tom, kde je měřený vodič uvnitř této smyčky umístěn.

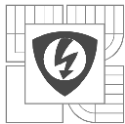
Proud, který protéká měřeným vodičem naindukuje napětí, které je obrazem derivace proudu podle času. Pokud je žádáno napětí, které je obrazem skutečné velikosti proudu je třeba k této cívce ještě připojit integrátor.

Velkou výhodou Rogowskeho cívky je také to, že musí (a tedy i může) pracovat naprázdno (a nedojde k poškození) na rozdíl od transformátoru proudu.



Obrázek 21: Ukázka konstrukčního požadavku na měřicí přístroj





### 4.1.2 Způsob měření

Měření rozložení proudů se provede nejprve změřením celkového proudu. Poté, pro každou svislou řadu nožů (tedy čísla nožů X-1, X-2, X-1 a X-2) bude změřen proud všech 3 nožů. Následně bude změřen proud horního a dolního nože. Proud prostředním nožem bude dopočten jako rozdíl proudu všech 3 nožů a proudů dolního a horního nože. Je to z toho důvodu, že k prostřednímu noži je velice špatný přístup a pravděpodobně by ani nebylo možno tento proud změřit.

## 4.2 Realizace měřícího přístroje

Protože nebyla k dispozici vhodná Rogowskeho cívka, bylo zapotřebí cívku vyrobit. Aby bylo možno cívku jednoduše používat i pro další měření, bylo velice vhodné vyrobit k ní do páru integrátor a provést kalibraci celku.

### 4.2.1 Požadavky

Přístroj se musí vejít do 5 mm svislé mezery mezi noži, aby bylo možno měřit každý nůž zvlášť. Musí být také schopen se ohnout tak, aby se po protáhnutí svislou mezerou vešel i s ohybem do 21 mm široké mezery mezi noži (viz. Obrázek 21).

Musí být schopen měřit proudy od 80 A až do 3150 A bez nutnosti rozebírat měřený obvod.

### 4.2.2 Rogowskeho cívka

Dle [13] je vztah napětí na svorkách toroidní cívky, za předpokladu, že poměr  $d/D$  je malý:

$$u(t) = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot d^2}{4 \cdot D} \cdot \frac{di}{dt} [V, Hm^{-1}, m, m, A] \quad (4.1)$$

kde: N - počet závitů cívky

d - průměr jádra

D - průměr cívky

i – protékající proud

Z tohoto vztahu vyplývá, že výstupní napětí je přímo úměrné velikosti průřezu jádra cívky (vyjádřeného průměrem d) a počtu závitů. Naopak nepřímo úměrné je průměru uzavřené cívky, tedy délce cívky rozvinuté. Aby bylo dosaženo velkého průřezu jádra a aby byla splněna rozměrová podmínka, musí být jádro obdélníkového tvaru.

Jako vhodné nemagnetické, nevodivé a ohebné jádro byl vybrán plstěný pásek o rozměrech 32 mm X 3 mm. Jeho průřez je tedy roven:

$$S = a \cdot b = 32 \cdot 3 = 96 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$



Další parametry již byly navrženy zkusmo a ověřeny výpočtem. Uveden je pouze postup návrhu finálních parametrů. Počet závitů cívky byl zvolen 2000. Pro navinutí byl zvolen lakovaný drát o průměru 0,1 mm. Cívka byla vinuta ručně, činitel plnění byl tedy uvažován 0,5. Na základě těchto parametrů byla určena délka (obvod) cívky:

$$o = \frac{N \cdot d_{0,1}}{k_p} = \frac{2000 \cdot 0,1}{0,5} = 400 \text{ mm} \quad (4.3)$$

Tyto hodnoty byly přepočteny na toroidní cívku, aby mohla být určena hodnota indukovaného napětí na svorkách cívky při nejnižší měřený proud.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 96}{\pi}} = 11,056 \text{ mm} \quad (4.3)$$

$$D = \frac{o}{\pi} = \frac{400}{\pi} = 127,324 \text{ mm} \quad (4.4)$$

$$\frac{d}{D} = \frac{11,056}{127,324} = 0,087 \quad (4.5)$$

Poměr  $d/D$  je dostatečně malý, platí tedy vztah (4.1). Nejnižší požadovaný měřený proud je 80 A:

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{\mu_0 \cdot N \cdot d^2}{4 \cdot D} \cdot \frac{di}{dt} \quad (4.6) \\ &= \frac{\mu_0 \cdot 2000 \cdot (11,056 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 127,324 \cdot 10^{-3}} \cdot 80 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \\ &= 0,015 \text{ V} \end{aligned}$$

Indukované napětí na Rogowskeho cívce navinuté na plstěném jádře o rozměrech 32 mm x 3 mm o délce 400 mm se 2000 závitů navinutými lakovaným vodičem o průměru 0,1 mm bude při průchodu proudu o velikosti 80 A rovno hodnotě 0,015 V. Tato hodnota je při použití kvalitního voltmetru dostatečná. Navíc za cívku bude ještě integrátor, který lze realizovat i se zesílením a výstupní signál zesílit.

Samotné navíjení cívky probíhalo ručně, a to tak, že první byl navinut kolmý závit středem cívky z vnitřní strany (ze strany směřující při zavnutí do středu). Pokud by byl tento závit navinut



z vnější strany, hrozilo by reálné nebezpečí přetrhnutí vodiče při zavínutí. Následně byly navinuty ostatní závitů směrem zpět k začátku vinutí. Tímto způsobem navíjení je výrazně potlačen vliv vnějšího rušení. Každý 20. závit byl přilepen izolační páskou, to z důvodu mechanického zajištění a také z důvodu snazší orientace v počtu závitů při navíjení. Konce vinutí byly připájeny na BNC kabel.

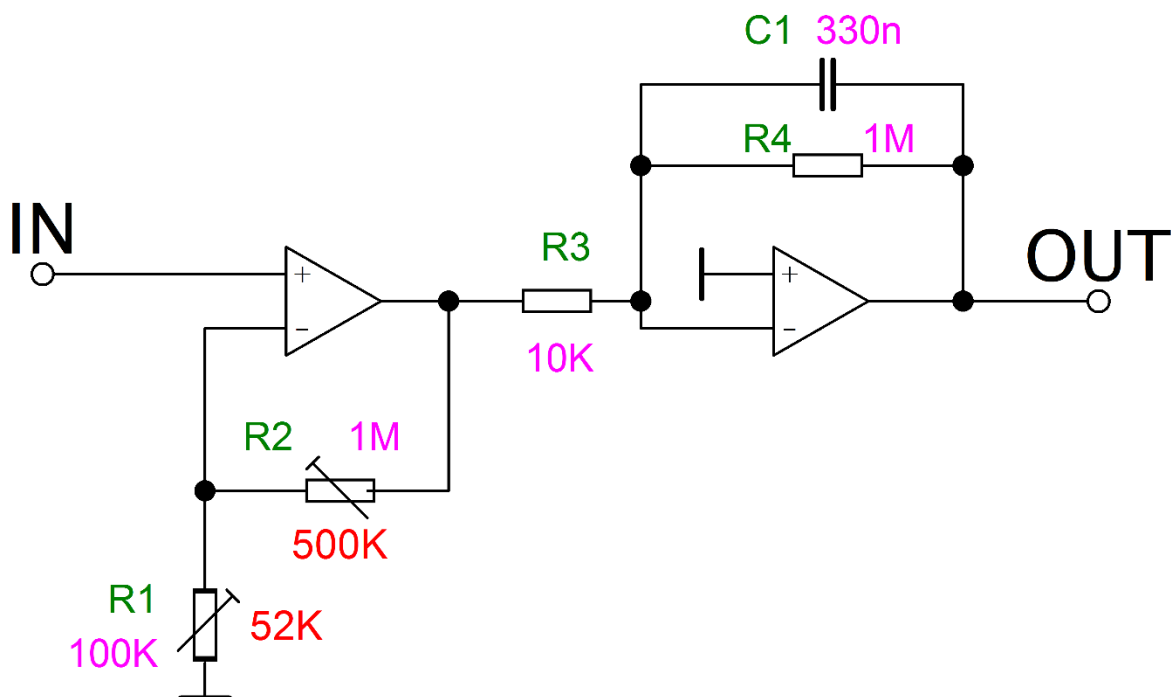
Posledním krokem bylo zalití celé cívky do neutrálního silikonu, aby byla zajištěna dostatečná mechanická odolnost.



Obrázek 22: Pohled na rozvinutou Rogowskeho cívku

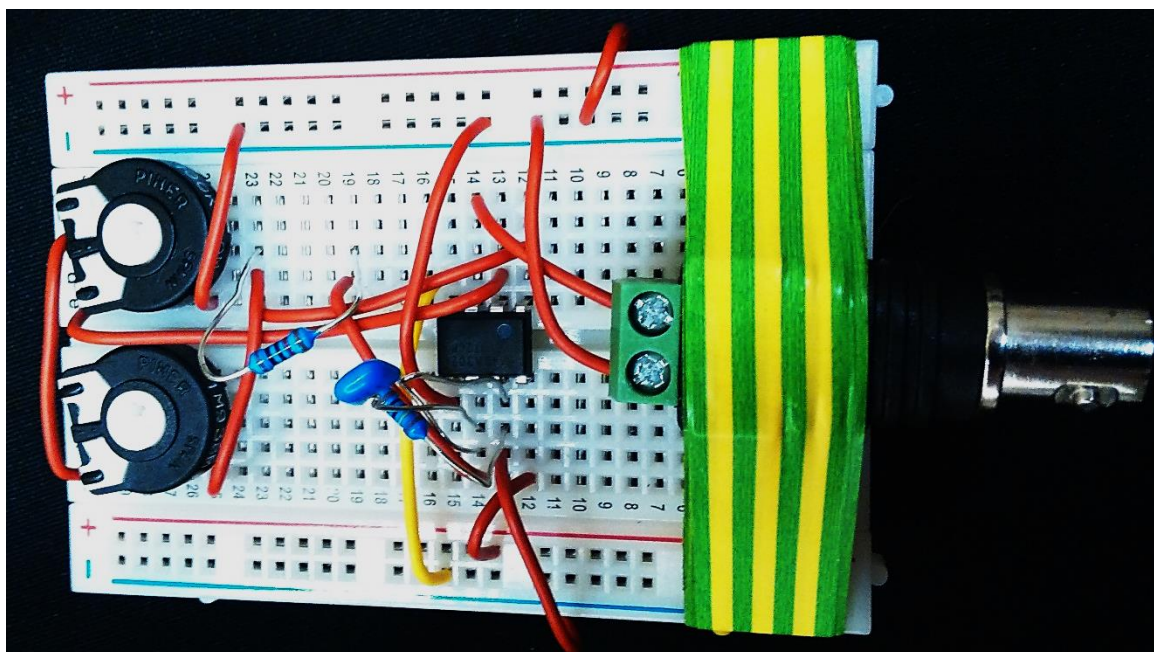
### 4.2.3 Integrátor

Integrátor je realizován pomocí dvou operačních zesilovačů (obvod TL072), z nichž jeden plní funkci integrátoru a druhý neinvertujícího zesilovače, který bude výstupní napětí cívky zesilovat. Výhodou neinvertujícího zesilovače je také to, že jeho vstupní odpor je nekonečně velký, Rogowskeho cívka tedy bude pracovat naprázdno. Jako rezistory R2 a R1 jsou použity trimry, aby mohlo být zesílení upraveno na požadovanou hodnotu při práci se skutečnou cívkou. Požadovaná převodní konstanta zesilovače a integrátoru je 2 mV/A. Časová konstanta byla zvolena tak, aby integrátor ideálně fungoval na síťové frekvenci 50 Hz.



Obrázek 23: Schéma zapojení integrátoru, červenou barvou jsou zobrazeny přednastavené hodnoty trimrů R1 a R2, které si při kalibraci budou dále upravovat.

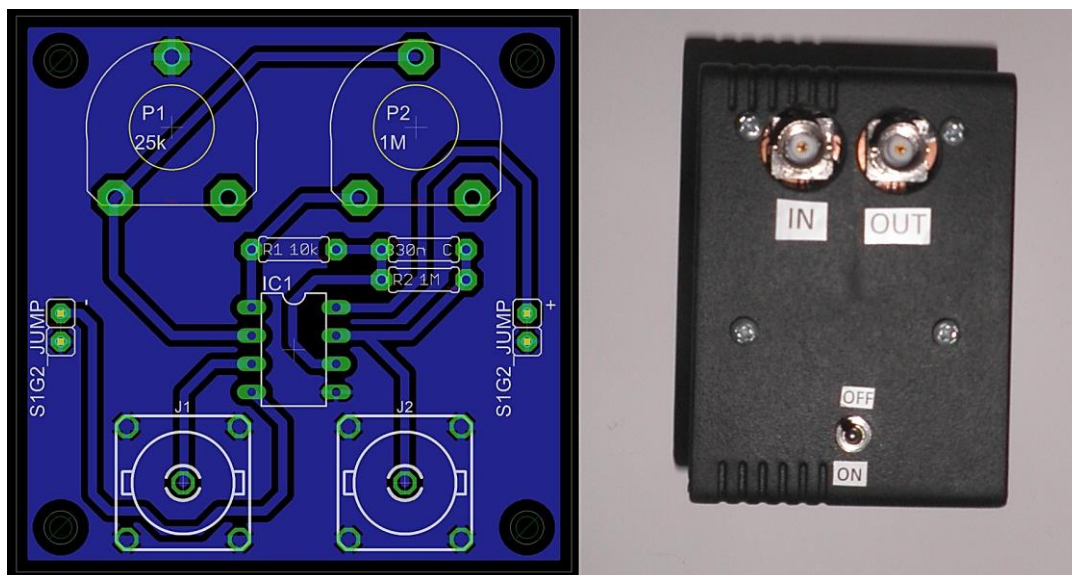
První verze byla realizována na nepájivém kontaktním poli.



Obrázek 24: Integrátor na nepájivém kontaktním poli



Kvůli problémům se spolehlivostí však bylo třeba integrátor realizovat jinak. Byla tedy navržena DPS a integrátor byl realizován na ní v uzavřené krabici. Vylitím země kolem součástek na DPS byl snížen vliv rušení. Přístroj je kvůli mobilitě napájen dvěma 9 V bateriemi.



Obrázek 25: Návrh DPS pro integrátor a konečná verze integrátoru

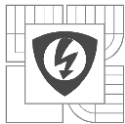
#### 4.2.4 Kalibrace

Aby bylo možno měřící přístroj – tedy cívku s integrátorem používat a získávat věrohodná data bylo třeba jej zkalibrovat. Kalibrace probíhala porovnáváním naměřených hodnot s hodnotami kalibrovaného přístroje. Při tomto úkonu byly mírně doladěny hodnoty trimrů R1 a R2, tak aby byla dodržena převodní konstanta 2 mV/A.

Zkalibrovaný měřící přístroj byla Rogowskeho cívka Chauvin Arnoux A100 a multimetr Fluke 8845A. Hodnoty naměřené těmito přístroji byly považovány za skutečné. Napětí z integrátoru bylo měřeno multimetrem Fluke 289. Autotransfátorem byly nastavovány přibližné hodnoty proudů 10 A až 300 A. Naměřené hodnoty byly porovnávány s hodnotami skutečnými a byla spočtena relativní chyba.

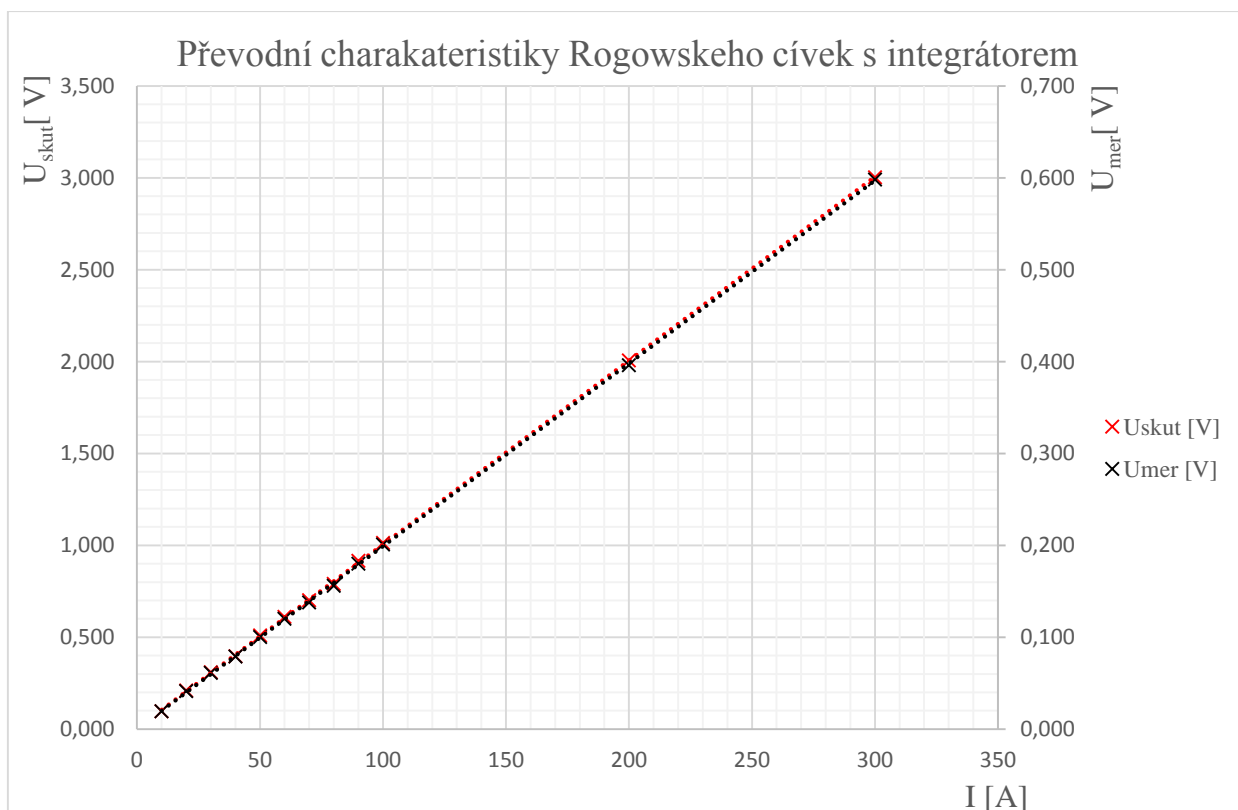
Tabulka 5: Seznam měřících přístrojů použitých při kalibraci vyrobené Rogowskeho cívky s integrátorem

Přístroj	Název	Výrobní číslo	Kalibrace	Č. kalibračního protokolu
Rogowskeho cívka s integrátorem, převod 10mV/A	Chauvin Arnoux A100	206541	21.3.2015	8017-KL-T0060-15
Voltmetr	Fluke 8845A	9564012	9.3.2015	6011-KL-L0244-15
Voltmetr	Fluke 289	97220164		

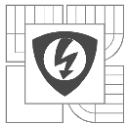


Tabulka 6: Tabulka skutečných a naměřených hodnot napětí, přepočteného proudu dle převodních konstant (skutečná hodnota: 10mV/A, naměřená hodnota 2mV/A) a relativní chyba naměřené hodnoty

I [A]	U <sub>skut</sub> [V]	U <sub>mer</sub> [V]	I <sub>skut</sub> [A]	I <sub>mer</sub> [A]	δ [%]
10	0,098	0,020	9,770	9,785	0,154
20	0,210	0,041	20,980	20,656	1,544
30	0,310	0,061	30,950	30,598	1,139
40	0,397	0,079	39,680	39,506	0,439
50	0,510	0,100	51,000	50,200	1,569
60	0,611	0,120	61,100	60,000	1,800
70	0,702	0,138	70,190	69,000	1,695
80	0,790	0,156	78,980	78,000	1,241
90	0,915	0,180	91,520	90,000	1,661
100	1,013	0,201	101,300	100,500	0,790
200	2,006	0,396	200,600	198,000	1,296
300	3,002	0,598	300,200	299,000	0,400



Obrázek 26: Převodní charakteristika Rogowskeho cívky s integrátorem Chauvin Arnoux A100 ( $U_{skut}$ ) a cívky vyrobené ( $U_{mer}$ )



Z průběhu převodních charakteristik lze vyčíst, že převodní konstanta vyrobeného přístroje 2mV/A je skutečně dodržena. Z naměřených hodnot byla určena relativní chyba. Ta dosahuje hodnoty nižší, než 2 %, což je velmi dobrý výsledek. Přístroj lze tedy použít pro měření.

### 4.3 Vyhodnocení měření a porovnání výsledků se simulací

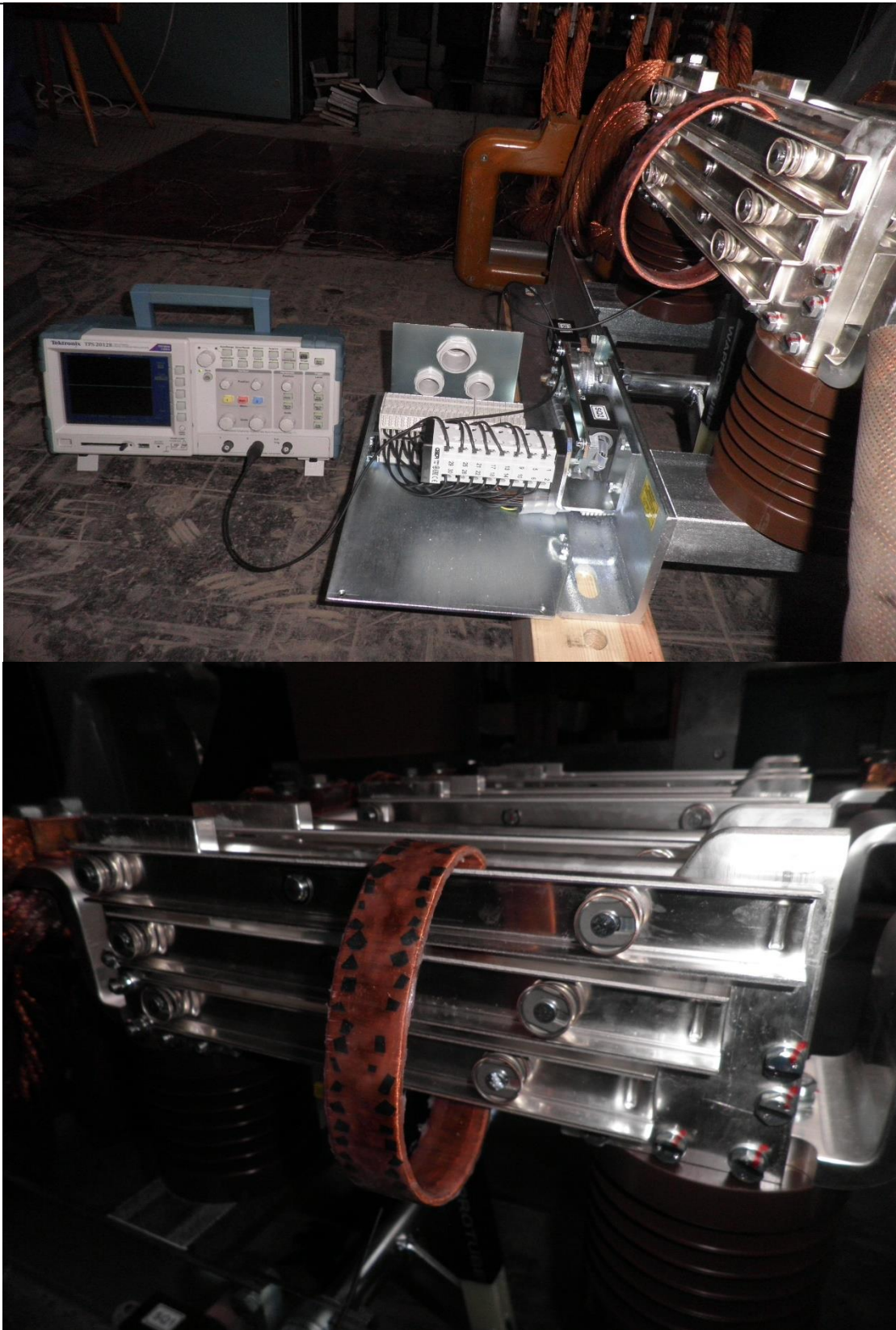
Samotné měření probíhalo ve zkušebně firmy IVEP, a.s. Bohužel na místě se projevila nespolehlivost provedení integrátoru na nepájivém kontaktním poli a tento přestal fungovat. Nicméně měření mohlo být provedeno, protože byl k dispozici další měřicí přístroj, pomocí kterého byl změřen celkový proud. U jednotlivých nožů poté byly změřeny, dle již zmíněného postupu měření, hodnoty indukovaného napětí v Rogowskeho cívce. Z těchto hodnot se určilo poměrné rozdělení proudů v nožích a ze znalosti celkového proudu se tyto poměry přepočítaly na skutečnou hodnotu proudů.

Pro měření byl zvolen jmenovitý proud odpojovače, tedy 3150 A. Odečítání probíhalo na osciloskopu Tektronix TPS2012B. Měření celkového proudu proběhlo na ovládacím pultu měřicího pracoviště s použitím transformátoru proudu.

*Tabulka 7: Naměřené hodnoty napětí a spočtené hodnoty skutečného rozložení proudů na odpojovací IVEP QAK 12.3150. Také je zde vypočtena relativní chyba vztážená k celkovému proudu.*

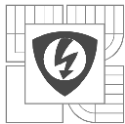
Číslo nože	Změřeno		FEMM	Chyba vztážená k $I_m$ .
	$U_{rs}[mV]$	$I_s [A]$	$I_N [A]$	$\delta_{vz} [%]$
1-1	84,43	352,59	385,22	1,04
1-2	52,43	218,95	247,71	0,91
2-1	63,90	266,85	247,64	0,61
2-2	30,23	126,24	86,27	1,27
3-1	76,50	319,47	381,85	1,98
3-2	42,50	177,48	244,31	2,12
4-1	48,10	200,87	244,20	1,38
4-2	85,40	356,64	375,75	0,61
5-1	45,07	188,22	84,12	3,30
5-2	65,60	273,95	239,55	1,09
6-1	69,83	291,62	240,95	1,61
6-2	90,30	377,10	372,45	0,15
<b>Celek</b>		3150,00	3150,00	

Naměřené hodnoty potvrdily výpočet a simulaci rozložení proudů mezi jednotlivé nože. Chyba, vztážená ke jmenovitému proudu odpojovače, dosáhla maximální hodnoty 3,30 %. Za kontrolní hodnotu byly považovány proudy, které byly spočteny v programu FEMM. Simulaci lze tedy považovat za velice přesnou a výsledky následujících simulací lze považovat za odpovídající skutečnosti.



Obrázek 27: Pohled na měřicí pracoviště a detail umístění Rogowskeho cívky na nožích.





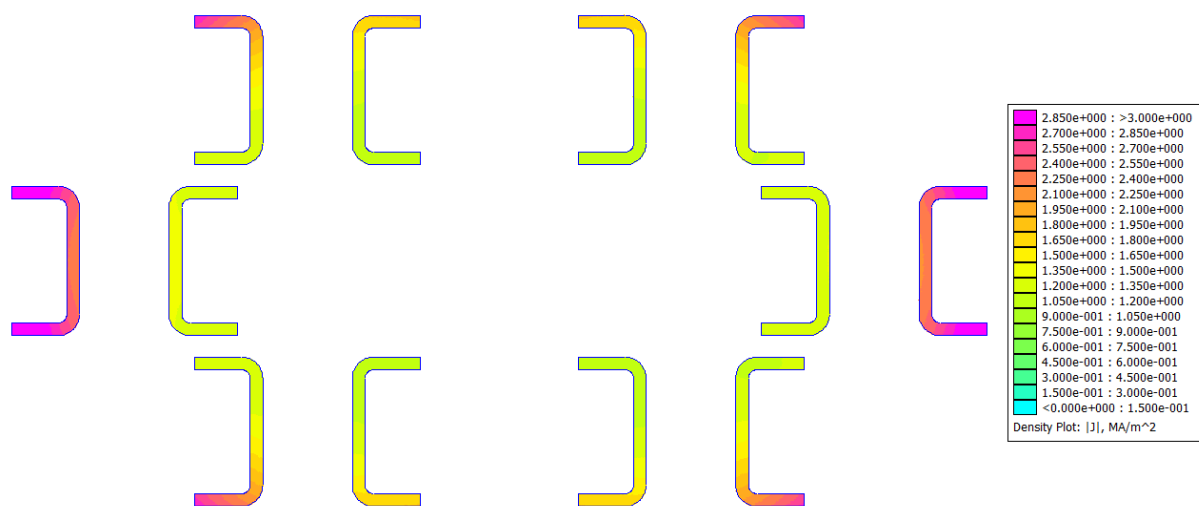
## 5 OPTIMALIZACE

Snížení vlivu Jevu blízkosti na rozložení proudové hustoty lze docílit změnou umístění jednotlivých nožů nebo využitím kombinovaného Jevu blízkosti [14], tedy přiložením blízkého feromagnetika. Dále jsou zmíněny, pro přehlednost, pouze nejefektivnější úpravy. Výsledky všech simulací jsou přiloženy v příloze č.1 a příloze č.2.

### 5.1 Se změnou konstrukce

Na základě faktu, že proud je vytlačován od fiktivního geometrického středu všech nožů směrem ven lze předpokládat, že rovnoměrně umístěné nože kolem tohoto středu způsobí rovnoměrné vytlačení proudů do všech nožů. Situace je však mírně zkomplikovaná požadavkem na umístění nožů vždy v páru na jeden kontakt, aby odolávaly dynamickým účinkům zkratového proudu. Proto se při simulaci mění poloha celých párů nožů. Kombinace tohoto požadavku a předchozího předpokladu nabízí jedinou možnost optimalizace, a to horizontální změnu polohy nožů 2 a 5. Sledovanými parametry jsou Koeficient vlivu Jevu blízkosti, průměrná odchylka proudů jednotlivých nožů a rozdíl maximálního a minimálního proudu. Proměnným parametrem pak je vzdálenost středů párů nožů od původní pozice.

Optimalizace našla minima všech sledovaných parametrů. Koeficient vlivu Jevu blízkosti dosáhl svého minima, stejně jako průměrná odchylka proudů při vzdálenosti 43 mm (úprava č.1).



Obrázek 28: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 43 mm (úprava č.1). Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz



Tabulka 8: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 43 mm (úprava č.1). Simulace v programu FEMM.

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	269,24	1,85	25,53
1-2	214,69	1,15	25,02
2-1	434,40	3,98	21,11
2-2	201,25	0,93	22,96
3-1	265,76	1,42	20,03
3-2	211,25	0,88	19,67
4-1	212,09	0,87	19,32
4-2	262,26	3,67	53,36
5-1	193,54	0,97	26,01
5-2	418,11	4,12	23,57
6-1	208,63	0,86	19,69
6-2	258,78	1,34	20,04
<b>Celek</b>	3150,00	22,04	1,91
<b>Průměrná odchylka</b>	56,25		
<b>Rozdíl MAX-MIN</b>	240,86		

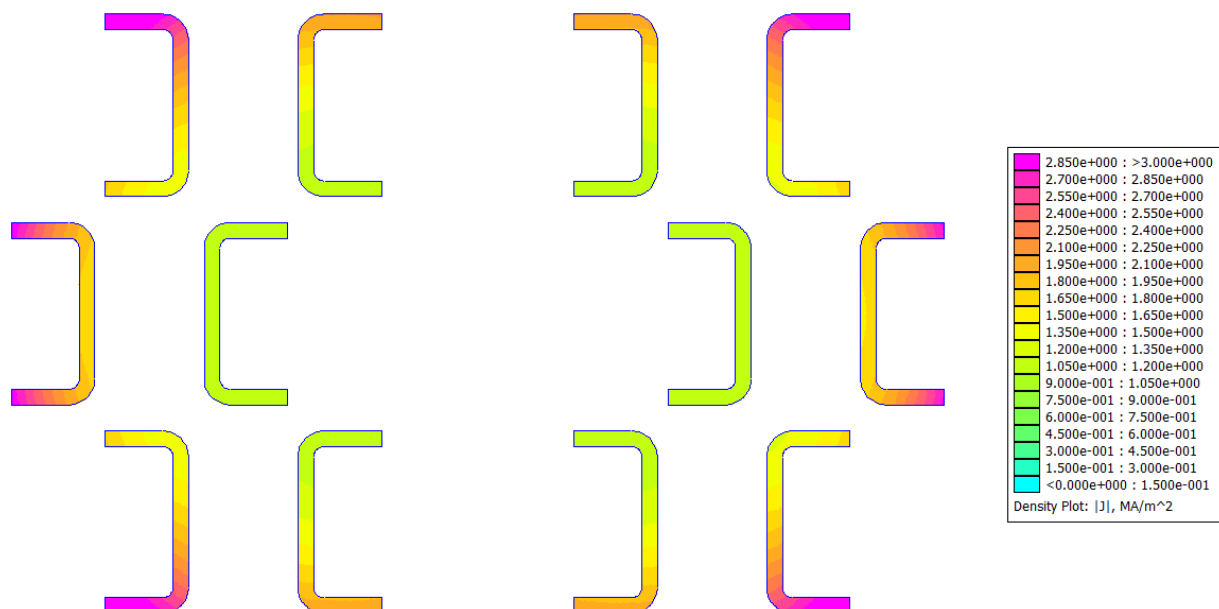
Koeficient vlivu Jevu blízkosti je opět dopočítán

$$k_b = \frac{R}{R_{p\u00fav}} = \frac{1,91}{1,46} = 1,31 \quad (5.1)$$

Koeficient vlivu Jevu blízkosti dosahuje výrazně nižší hodnoty, než je původní (1,52). Průměrná odchylka dosahuje pouze 56,25 A (původní 77,54 A). Také rozdíl maximálního a minimálního proudu dosahuje nižší hodnoty, a to 240,86 A (proti původním 301,10 A). Nevýhodou tohoto rozložení je fakt, že vzrostlo maximální proudové namáhání jednotlivých nožů. Maximum proudu je přeneseno z rohových nožů na nože 2-1 a 5-2 a dosahuje hodnoty 434,4 A. Tedy o téměř 50 A více, než při skutečném rozložení. Tato varianta sice dosahuje lepších hodnot všech sledovaných parametrů, ale právě díky velkému namáhání těchto dvou nožů je zavrhnuta. Docházelo by sice k rovnoměrnému ohřevu zbylých nožů, ale tyto dva nože by opět dosahovaly značných teplot a výsledek optimalizace by nebyl kladný.



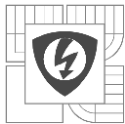
Minimum rozdílu maximálního a minimálního nastává při vzdálenosti 18 mm (úprava č.2).



Obrázek 29: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 18 mm (úprava č.2). Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

Tabulka 9: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože. Horizontální vzdálenost středů párů nožů 2 a 5 od původní polohy je 18 mm (úprava č.2). Simulace v programu FEMM.

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	333,55	2,80	25,12
1-2	235,01	1,42	25,77
2-1	336,79	2,32	20,44
2-2	127,15	0,68	42,25
3-1	329,93	2,14	19,69
3-2	231,58	1,09	20,27
4-1	232,07	1,39	25,79
4-2	325,10	2,65	25,11
5-1	123,04	0,65	43,00
5-2	325,47	2,16	20,35
6-1	228,64	1,06	20,28
6-2	321,68	2,04	19,68
Celek	3150,00	20,39	1,99
Průměrná odchylka	66,25		
Rozdíl MAX-MIN	213,75		



$$k_b = \frac{R}{R_{p\u00fav}} = \frac{1,99}{1,46} = 1,36 \quad (5.2)$$

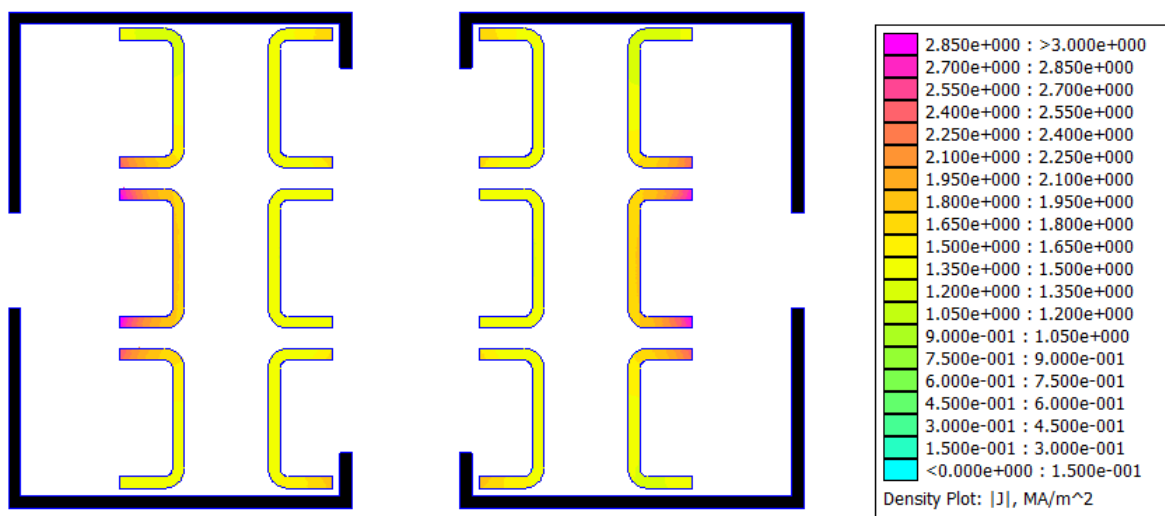
Koeficient vlivu Jevu blízkosti je v tomto případě mírně vyšší – 1,36, ale stále výrazně nižší, než původní. Průměrná odchylka také mírně vzrostla, na hodnotu 66,25 A, ale stejně jako Koeficient je stále nižší, než původní. Nejvýraznějším je pokles rozdílu maximálního a minimálního proudu, který klesl téměř o 90 A na hodnotu 213,75 A. Rozdíl proudů v tomto případě není tak vysoký, aby docházelo k výraznému ohřevu některých nožů proti ostatním.

Realizace této konstrukce při zachování funkčnosti by pravděpodobně vyžadovala přidání další řady pevných kontaktů, do kterých by zapadaly nože 2 a 5. Také by musel být upraven stávající pevný kontakt, aby nepřekážel při spínání právě nožům 2 a 5. Tento fakt je však technologicky mnohem náročnější. Výhoda rovnoměrnějšího ohřevu všech nožů je tedy tímto vyvážena, či spíše převážena. Proto další optimalizace bude vycházet ze stávající konstrukce.

## 5.2 S využitím stávající konstrukce

Při zachování polohy nožů přichází v úvahu využití kombinovaného Jevu blízkosti. Tedy umístění feromagnetika poblíž proudovodné dráhy. Na základě dostatečného počtu různých simulací (viz. příloha č.2) byl stanoven postulát, že přiložení feromagnetika k proudovodné dráze způsobí vytlačení proudové hustoty a tedy i proudu směrem od tohoto feromagnetika. Byly provedeny simulace s různým umístěním feromagnetika (označeno černou barvou). Je patrné, že feromagnetikum přinese do odpojovače dodatečné ztráty, ty jsou také vyčísleny. Nejprve je uvedeno umístění feromagnetika, které sice dosahovalo výborných výsledků, ale z důvodu výrazného zhoršení chlazení bylo zavrhnuto (úprava č.3).

Sledovanými parametry opět byly Koeficient vlivu Jevu blízkosti, průměrná odchylka proudů jednotlivých nožů a rozdíl maximálního a minimálního proudu. Úprava č.3 dosáhla nejnižšího rozdílu proudů, 99,07 A. Dosáhla také nejnižší průměrné odchylky a také koeficientu vlivu Jevu blízkosti, a to 20,69 A respektive 1,23. Jak již bylo zmíněno, toto umístění feromagnetika bylo, i přes výborné výsledky, zavrhnuto. Takovéto uspořádání totiž zcela zabraňuje přirozenému proudění vzduchu kolem nožů odpojovače a tím eliminuje chladicí účinek právě tohoto proudění, se kterým návrh odpojovače počítá. Úprava by tedy sice způsobila rovnoměrnější rozložení teplot, ale celková teplota by výrazně stoupla, což je nežádoucí. Navíc ztráty ve feromagnetiku při použití jednolitě oceli, která se jeví jako jediná vhodná, byly u takto rozměrné konstrukce spočteny na 144 W (téměř osminásobek ztrát v mědi). Dále jsou tedy zkoumána rozměrově menší feromagnetika umístěna vedle nožů odpojovače.

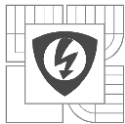


Obrázek 30: Ukázka nevhodného umístění feromagnetika. Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.3. Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

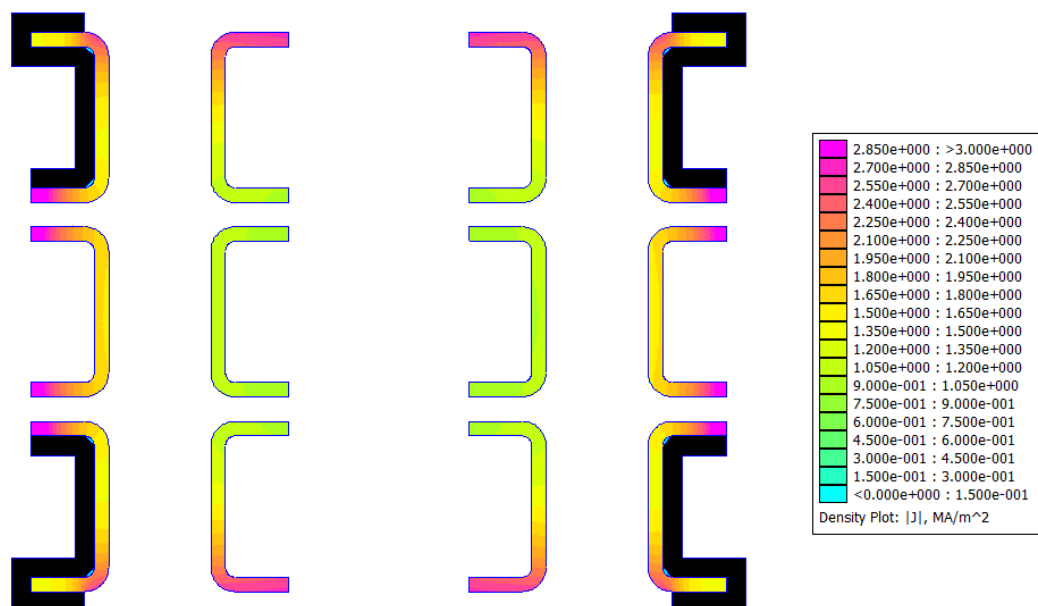
Tabulka 10: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.3. Simulace v programu FEMM.

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	254,81	1,44	22,21
1-2	252,44	1,30	20,42
2-1	326,82	2,43	22,71
2-2	228,88	1,13	21,63
3-1	262,96	1,52	22,04
3-2	256,90	1,35	20,44
4-1	251,55	1,29	20,42
4-2	251,05	1,40	22,21
5-1	227,75	1,12	21,61
5-2	321,86	2,35	22,66
6-1	255,86	1,34	20,45
6-2	259,08	1,48	22,03
<b>Celek</b>	<b>3149,97</b>	<b>18,15</b>	<b>1,79</b>
<b>Průměrná odchylka</b>	<b>20,69</b>		
<b>Rozdíl MAX-MIN</b>	<b>99,07</b>		

$$k_b = \frac{R}{R_{p\u017bv}} = \frac{1,79}{1,46} = 1,23 \quad (5.3)$$



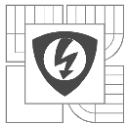
Nejnižší průměrné odchylky a také rozdíl proudů dosáhlo následné umístění feromagnetika přímo na krajní nože odpojovače (úprava č.4).



Obrázek 31: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.4. Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

Tabulka 11: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.4. Simulace v programu FEMM.

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	303,43	2,32	25,23
1-2	269,37	2,03	27,95
2-1	330,98	2,28	20,80
2-2	118,20	0,59	42,38
3-1	300,94	1,80	19,84
3-2	266,36	1,56	21,92
4-1	267,01	1,99	27,96
4-2	297,26	2,22	25,17
5-1	116,07	0,58	42,68
5-2	321,78	2,15	20,76
6-1	263,80	1,53	21,93
6-2	294,72	1,72	19,79
Celek	3149,90	20,76	2,06
Průměrná odchylka	48,45		
Rozdíl MAX-MIN	214,92		

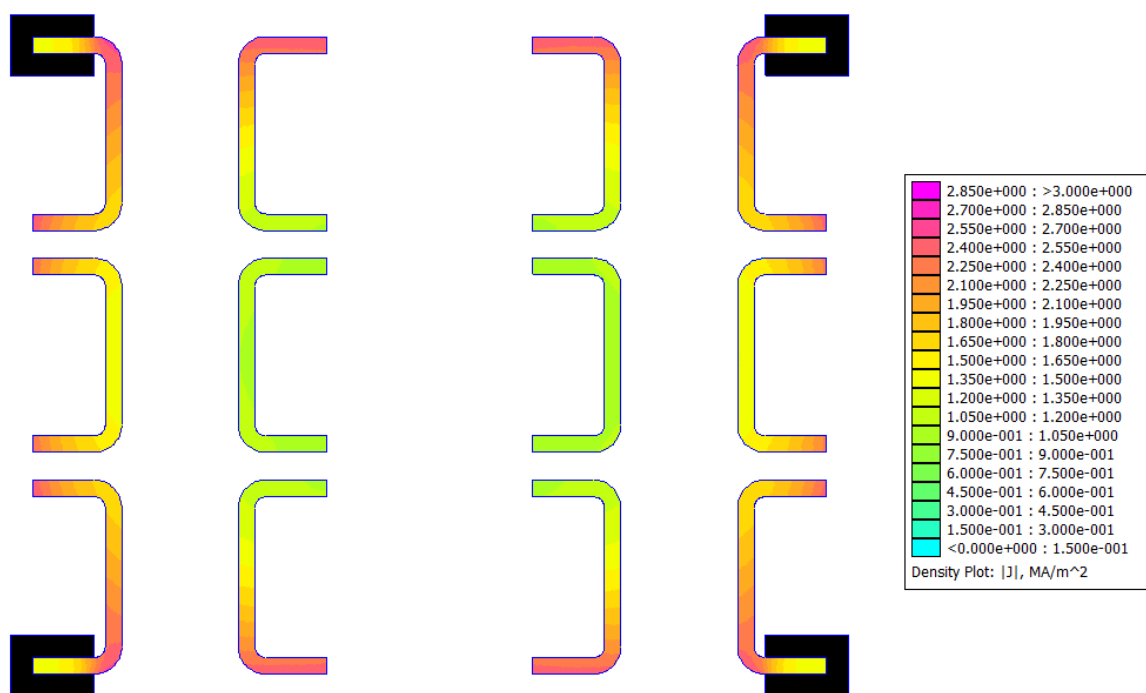


(5.4)

$$k_b = \frac{R}{R_{p\u00fav}} = \frac{2,06}{1,46} = 1,41$$

Tato úprava dosahuje dobrých výsledků, co se týče průměrné odchylky – 48,45 A a taky rozdílu maxima a minima – 214,92 A. Koeficient vlivu Jevu blízkosti dosahuje hodnoty 1,41. Ztráty ve feromagnetiku byly vyčísleny na 13,80 W při použití jednodílné oceli. Při použití slisovaných, vzájemně izolovaných plechů o tloušťce 0,3 mm (stejně jako jha rotorů a statorů motorů) dosahují ztráty hodnoty řádově jednotky mW. Tato varianta tvaru feromagnetika je však technologicky velice náročná jak pro výrobu z jednodílné oceli tak také pro výrobu z laminované oceli. Proto je zavrhnuta

Další úprava, úprava č.5, již využívá značně jednoduššího tvaru feromagnetika, jež je umístěno opět přímo na krajních nožích.



Obrázek 32: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.5. Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz



Tabulka 12: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.5. Simulace v programu FEMM.

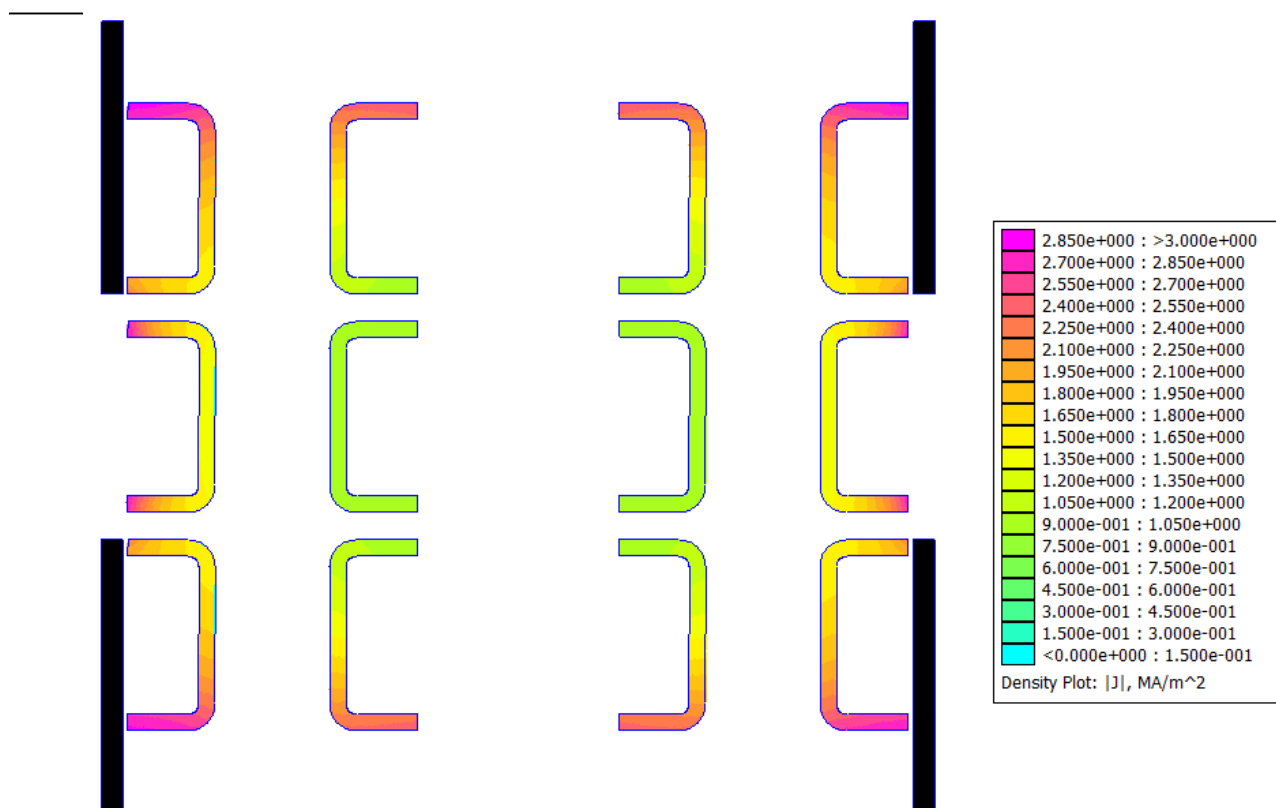
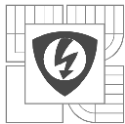
Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	331,77	2,47	22,46
1-2	270,28	1,91	26,19
2-1	280,01	1,51	19,26
2-2	113,70	0,58	44,87
3-1	328,91	1,91	17,63
3-2	266,87	1,46	20,56
4-1	267,07	1,81	25,34
4-2	324,04	2,35	22,42
5-1	111,27	0,56	45,39
5-2	271,36	1,42	19,26
6-1	263,54	1,43	20,59
6-2	321,19	1,82	17,59
Celek	3149,99	19,23	1,90
Průměrná odchylka	50,01		
Rozdíl MAX-MIN	220,50		

$$k_b = \frac{R}{R_{p\u00fav}} = \frac{1,90}{1,46} = 1,30 \quad (5.5)$$

Tato úprava dosahuje opět velmi dobrých výsledků všech tří sledovaných parametrů. Koeficient vlivu Jevu blízkosti dokonce dosahuje hodnoty nejnižší, a to 1,30. Rozdíl maxima a minima proudu je mírně vyšší, než v předchozím případě – 220,50 A. Mírně vzrostla také průměrná odchylka na hodnotu 50,01 A. Z rozložení proudové hustoty je vidět výrazně rovnoměrnější rozložení. Navíc tento tvar feromagnetika je výrazně technologicky jednodušší na výrobu jak z jednolitě oceli, tak také z laminované. Ztráty ve feromagnetiku by dosahovaly hodnot 9,44 W, respektive 1,2 mW. Výhodou je také možnost použití feritového „U“ jádra, jako feromagnetika. Jádro by bylo nasazeno na nože odpojovače, pravděpodobně by se jednalo o několik menších jader vedle sebe. Ztráty by v tomto případě byly téměř nulové a výsledek stejný. Tato jádra jsou běžně vyráběna sériově a tudíž by ani nebylo třeba zadávat novou výrobu. Například firma PRAMET a.s. dodává jádra, která přesně pasují na nože odpojovače. Jedná se o jádra U10/3, tedy jádra 10 mm široká s 3,8 mm otvorem (prostor na lepidlo a teplotní dilatace). Cenově se tato jádra pohybují v jednotkách Kč, konkrétní cena záleží na odebíraném množství. Při uvažování 39 jader na horní nůž (délka 396 mm) a 31 jader na dolní (délka 311 mm), tedy celkem 140 jader a kvalitního lepidla by se jednalo o investici do 1000 Kč.

Poslední úprava, úprava č.6, má zásadní rozdíl v tom, že feromagnetikum je napevno přichyceno k základně odpojovače a ne k nožům.

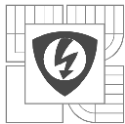




Obrázek 33: Simulace rozložení proudové hustoty v upraveném odpojovači, úprava č.6. Simulace provedena v programu FEMM,  $I = 3150$  A,  $f = 50$  Hz

Tabulka 13: Velikosti proudů, ohmických ztrát a elektrického odporu každého nože v upraveném odpojovači, úprava č.6. Simulace v programu FEMM.

Číslo nože	I [A]	Pztr [W]	R [ $\mu\Omega$ ]
1-1	346,20	2,70	22,54
1-2	257,79	1,79	26,91
2-1	281,84	1,63	20,53
2-2	106,35	0,53	46,60
3-1	342,87	2,08	17,67
3-2	254,48	1,37	21,12
4-1	255,00	1,75	26,94
4-2	338,99	2,59	22,55
5-1	104,27	0,51	47,10
5-2	273,81	1,53	20,46
6-1	252,06	1,34	21,16
6-2	336,38	2,01	17,72
Celek	3150,04	19,83	1,96
Průměrná odchylka	57,51		
Rozdíl MAX-MIN	241,93		



$$k_b = \frac{R}{R_{p\u00fcrv}} = \frac{1,96}{1,46} = 1,34 \quad (5.6)$$

Úprava č.6 má za následek mírné zvýšení Koeficientu vlivu Jevu blízkosti proti předchozí úpravě, ale pořadí je značně nižší, než bez úprav. Rozdíl maximálního a minimálního proudu také mírně vzrostl na hodnotu 241,93 A a průměrná odchylka na hodnotu 57,51 A. Také zde je vidět výrazně rovnoměrnější rozložení proudové hustoty. Při použití jednoduté oceli by ztráty ve feromagnetiku dosahovaly hodnoty 34,25 W, laminovaná ocel by dosahovala hodnoty 3,7 mW. V tomto případě by muselo feromagnetikum upevněno pomocí konstrukce z nemagnetického materiálu (materiálu s poměrnou permeabilitou rovnou 1). Například ze silonu. Tato konstrukce však musí být dostatečně pevná, aby odolala silám, které vyvolá průchod zkratového proudu.

### 5.3 Zhodnocení

Při vyhodnocování byla jednotlivým sledovaným parametrům přiřazena váha. Ta byla rozdělena rovnoměrně mezi zefektivnění průchodu proudu (0,5) a finanční náročnosti (0,5). Obě části jsou ještě rozděleny. V první je nejvyšší váha přiřazena Koeficientu vlivu Jevu blízkosti (0,3), průměrné odchylce a rozdílu maximálního a minimálního proudu je váha přiřazena shodně (0,1). V druhé části je nejvyšší váha přiřazena finančním nákladům, které zahrnují také změnu technologie výroby (0,4) a nárůstu ztrát zbylá (0,1). Poté byl vypočítán, jako součin váhy a hodnoty každého parametru, výsledný parametr. Jelikož je snahou optimalizace nalezení nejnižší hodnoty všech sledovaných parametrů a také finanční náročnosti lze z výsledného parametru zvolit nejvýhodnější řešení pouze tím, že je nalezena jeho nejnižší hodnota.

Finanční náklady byly odhadnuty u prvních dvou řešení s ohledem na změnu konstrukce odpojovače. U dalších byly odhadnuty na základě množství použitého materiálu, jeho úpravě (ohyby) a jeho uchycení ke stávající konstrukci.

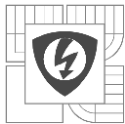
Tabulka 14: Výsledná tabulka se sledovanými parametry včetně výběru nejvýhodnějšího řešení. Zobrazeny jsou, pro přehlednost, pouze nejefektivnější úpravy.

Úprava č.	$k_b$ [-]	Prům. odchylka [A]	Rozdíl max - min [A]	Finanční náklady [Kč]	Nárůst ztrát [%]	Výsledný parametr
1	1,31	56,25	240,86	100000	0	40030,1
2	1,36	66,25	213,75	100000	0	40028,4
3	1,23	20,69	99,07	10000	800	4092,3
4	1,41	48,45	214,92	1000	66	433,4
5	1,30	50,01	220,50	1000	1	427,5
6	1,34	57,51	241,93	2000	172	847,5
Váha parametru	0,30	0,10	0,10	0,40	0,10	



---

Jako nejvýhodnější řešení se tedy jeví úprava s číslo 5. Kdy jsou na krajní nože nasazeny feritová jádérka ve tvaru „U“, která se standardně vyrábějí. Touto úpravou dojde ke snížení rozdílu maximální a minimálního proudu z 301,10 A na hodnotu 220,50 A, tedy o téměř 27 %. Také se sníží průměrná odchylka proudů jednotlivých nožů, a to z hodnoty 77,54 A na hodnotu 50,01 A, což je pokles o více, než 35 %. Nejvíce namáhanými noži tedy protéká o 198 % vyšší proud než nejméně namáhanými, což je pokles o více, než 160 %. Koeficient vlivu Jevu blízkosti klesl o téměř 15 % z hodnoty 1,52 na hodnotu 1,30. Materiál a úprava byly vyčísleny na 1000 Kč. Ztráty, díky použití feritových jader, téměř nenarostly (1 %).



## 6 ZÁVĚR

Je popsána funkce odpojovače a jeho základní rozdělení, dle mechanismu, montáže, provedení a ovládání. Také jsou popsány modifikace odpojovače, jako odpínač či přepínač. V další části je popsán odpojovač firmy IVEP a.s. typ QAK 12.3150. Jedná se o odpojovač pracující na hladině 12 kV se jmenovitým proudem 3150 A. Je konstruován jako šestinožový na jeden pól, kdy každý nož se skládá ze dvou dílčích nožů. Uspořádání nožů je ve dvou sloupcích, po třech nad sebou. Také je popsán problém, jenž byl důvodem k zadání a zhotovení této práce, a to nadměrné zahřívání rohových nožů odpojovače.

V další kapitole je navržena metoda zjišťování stavu optimalizace. Jako parametr, který bude sledován, byl vybrán Koeficient Jevu blízkosti. Pro analýzu stávajícího stavu byl tento parametr spočten analyticky, dosáhl hodnoty 1,57. Dále byl stávající stav simulován ve třech různých prostředích. Z výsledků těchto simulací byl opět určen Koeficient Jevu blízkosti, tentokrát jako poměr aktuálního elektrického odporu proudovodné dráhy ku odporu ničím neovlivněné proudovodné dráhy. Prvním prostředím, které bylo následně vybráno pro simulaci optimalizovaných odpojovačů byl program FEMM. Koeficient v této simulaci dosáhl hodnoty 1,52, což je téměř shodné s analyticky zjištěnou hodnotou. Druhá simulace proběhla v prostředí Ansys Maxwell 2D. Výsledky obou simulací byly shodné. Poslední simulace proběhla v Ansys Maxwell 3D, tato simulace měla však pouze potvrdit domněnku, že pevné kontakty nemají zásadní vliv na rozložení proudové hustoty v nožích. Tuto domněnku také potvrdila. Velkou výhodou simulací je také to, že zobrazily celkový proud, který protéká jednotlivými noži. Nejvyšší proud protéká právě rohovými noži, a to 385,22 A a nejnižší pak prostředními noži, a to 84,12 A. Krajními noži tedy protéká o téměř 360 % větší proud, než prostředními. Na základě toho byly ke sledovaným parametrům ještě přiřazena průměrná odchylka proudů a také rozdíl maximálního a minimálního proudu.

Následně je, na základě technických požadavků, hlavně geometrických rozměrů, navržen, sestaven a zkalibrován měřicí přístroj (Rogowskeho cívka s integrátorem), pomocí kterého je změřeno skutečné rozložení proudu na odpojovači. Výsledky korespondují s výsledky simulace, chyba vztažená k maximálnímu proudu dosahuje v nejhorsím případě 3,30 %. Na základě tohoto faktu lze výsledky následných simulací považovat za odpovídající skutečnosti.

Změnu rozložení proudové hustoty ovlivněné Jevem blízkosti lze docílit změnou geometrického uspořádání nebo využitím kombinovaného Jevu blízkosti, tedy přiložením blízkého feromagnetika. Na základě těchto faktů je navrženo několik optimalizací, které jsou simulovány, a u kterých jsou sledovány všechny tři parametry (koeficient vlivu Jevu blízkosti, průměrná odchylka proudů a rozdíl maximálního a minimálního proudu). Těmto úpravám je následně přiřazena finanční náročnost, která v sobě zahrnuje také změnu technologie či technologického postupu výroby. U úprav využívající blízké feromagnetikum je také dopočten nárůst ztrát, způsoben právě ztrátami v tomto feromagnetiku. Všem těmto parametrům je přiřazena různá váha a na základě této váhy a skutečnosti, že hledáme minimum všech parametrů je součtem součinů parametrů a jim přiřazených vah spočten výsledný parametr, který slouží k výběru optimální možnosti. Je to ta možnost, která dosahuje, na základě předchozí úvahy, nejnižší hodnoty výsledného parametru.



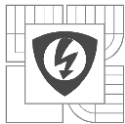
---

Při úpravách využívající blízké feromagnetikum je na základě dostatečného počtu simulací stanoven postulát, že přiblížení feromagnetika k proudovodné dráze způsobí vytlačení proudu směrem dále od tohoto feromagnetika. Další úpravy, zmíněné v práci, již vycházely z tohoto postulátu a dále jej potvrzovaly.

Optimální úpravou je výpočtem zvolaná úprava č.5. Tato úprava využívá pro rovnoměrnější rozložení proudů kombinovaného Jevu blízkosti. Jako feromagnetikum je zvoleno feritové jádérko ve tvaru písmene U, které je nasazeno na rohových nožích a způsobuje vytlačení proudů do ostatních nožů. Díky použitému materiálu je nárůst ztrát zcela zanedbatelný. Finančně tato úprava také není náročná, protože jsou použita běžně sériově vyráběná jádra a odpojovač není třeba nijak mechanicky upravovat či rozebírat. Úprava však způsobí pokles rozdílů proudů, nejvíce namáhanými noži nyní protéká proud pouze o 198 % vyšší, než nejméně namáhanými. Což je proti původním 360 % velice významný rozdíl. Jinými slovy poměr nejnižšího a nejvyššího proudu v noži klesl z původní hodnoty 1 : 4,6 na hodnotu 1 : 2,9. Koeficient vlivu Jevu blízkosti klesl z hodnoty 1,52 na hodnotu 1,30.

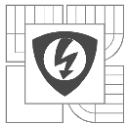
Upravený odpojovač měl být původně realizován a měřen ještě před datem odevzdání práce, ale z důvodu vysoké finanční náročnosti byla výroba prototypu přesunuta k nejbližší další plánované výrobě odpojovače.

Takto optimalizovaný odpojovač je tedy doporučen k realizaci.



## LITERATURA

- [1] IVEP, a.s. Katalog: Vnitřní odpojovače, Vnitřní uzemňovače pro napětí 1,2 - 72 kV, typ QAK; QAKZ; QZ; QAK P; PQAk. 2013, 20 s.
- [2] IVEP, a.s. VNITŘNÍ ODPOJOVAČ TYP QAS. 2014.
- [3] GÖRIG, Tomáš. Návrh odpojovače 30 kV, 630 A: Projekt do předmětu MSVP. 1. vyd. 2012.
- [4] HELŠTÝN, David, Petr KAČOR a Zdeněk HYTKA. Elektrické přístroje spínací, ochranné a jisticí: průvodce studiem. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2003, 50 l. ISBN 80-248-0315-1.
- [5] HAVELKA, Otto a kol. : Elektrické přístroje učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických, SNTL 1985
- [6] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: VUT, 1982, 318 s. ISBN 04-529-85.
- [7] MĚŘIČKA J., ZOUBEK Z. : Elektrické stroje, skriptum ČVUT 1990
- [8] ŠIMEK, D. Výpočet a měření oteplení odpojovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 69 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc..
- [9] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [10] RAČEK, Jiří. Mechanika pro silnoproudou elektrotechniku a elektroenergetiku: přehled teorie a úlohy. 1. vyd. Brno: Vutium, 2000, 161 s. ISBN 80-214-1662-9.
- [11] NOVOTNÝ, Vladimír a Zdeněk VÁVRA. Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí. Praha: SNTL/Alfa, 1986, 272 s. ISBN 04-531-86.
- [12] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I: určeno pro posluchače fakulty elektrotechnické. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1985, 188 s., příl.
- [13] VOREL, Pavel a Petr PROCHÁZKA. 2009. Řídicí členy v elektrických pohonech. Brno. Skriptum. FEKT, VUT.
- [14] DĚDEK, Libor a Jarmila DĚDKOVÁ. Elektromagnetismus. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 2000, 232 s. ISBN 80-214-1548-7.
- [15] PRAMET, a.s. Katalog: Konstrukční katalog feritových jader, 2014, 59 s.
- [16] PRAMET, a.s. Katalog: Ceník feritových jader, 2014, 59 s.



## PŘÍLOHY

### Příloha č.1 – výsledky simulací se změnou konstrukce

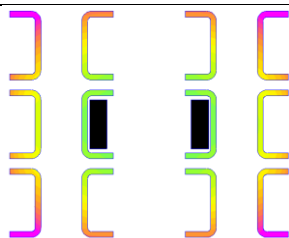
Hodnota v prvním řádku udává vzdálenost středu páru prostředních nožů od původní pozice

	30 mm	25 mm	20 mm	35 mm	40 mm	45 mm	46 mm	44 mm	43 mm	42 mm
Číslo nože	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]
1-1	297,73	311,97	327,38	285,42	274,73	265,78	264,25	267,50	269,24	271,02
1-2	227,48	230,81	233,80	223,39	218,21	212,22	211,00	213,45	214,69	215,91
2-1	393,01	371,17	346,89	411,73	426,81	438,33	440,48	436,69	434,40	431,95
2-2	158,55	144,80	132,05	173,76	190,51	208,54	212,17	204,92	201,25	197,62
3-1	294,62	308,46	323,64	281,69	271,23	262,39	260,79	264,03	265,76	267,46
3-2	224,07	227,45	230,39	219,85	214,74	208,80	207,58	210,03	211,25	212,43
4-1	224,74	227,98	230,89	220,54	215,54	209,70	208,52	210,94	212,09	213,23
4-2	290,17	304,09	319,07	277,83	267,64	256,08	257,54	260,66	262,26	264,04
5-1	152,85	139,80	127,71	167,29	183,29	200,55	204,04	196,97	193,54	190,08
5-2	379,23	358,38	335,24	396,90	411,09	422,39	424,23	420,27	418,11	415,87
6-1	221,29	224,50	227,43	217,13	212,07	206,20	205,02	207,42	208,63	209,85
6-2	286,72	300,60	315,51	274,47	264,14	255,53	254,01	257,10	258,78	260,55
	15 mm	17 mm	18 mm	19 mm						
Číslo nože	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]						
1-1	342,75	336,72	333,55	330,53						
1-2	236,88	235,68	235,01	234,47						
2-1	321,37	331,73	336,79	341,81						
2-2	119,96	124,76	127,15	129,59						
3-1	339,32	333,07	329,93	326,85						
3-2	233,59	232,25	231,58	231,07						
4-1	233,95	232,60	232,07	231,43						
4-2	334,27	328,10	325,10	322,02						
5-1	116,18	120,72	123,04	125,34						
5-2	310,53	320,45	325,47	330,32						
6-1	230,50	229,25	228,64	228,03						
6-2	330,71	324,66	321,68	318,55						



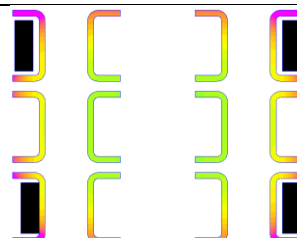
## Příloha č.2 – výsledky simulací s využitím stávající konstrukce

Legenda k rozložení proudové hustoty je na konci přílohy. Každá úprava je značena FMxx.



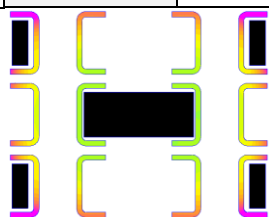
FM1

Číslo nože	I [A]
1-1	393,86
1-2	250,46
2-1	249,62
2-2	61,52
3-1	390,39
3-2	247,07
4-1	247,18
4-2	384,41
5-1	59,46
5-2	241,51
6-1	243,66
6-2	380,88



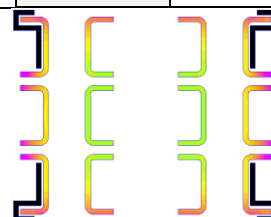
FM2

Číslo nože	I [A]
1-1	376,85
1-2	243,60
2-1	274,77
2-2	83,07
3-1	373,22
3-2	241,74
4-1	242,69
4-2	368,16
5-1	81,50
5-2	260,73
6-1	239,12
6-2	364,55



FM3

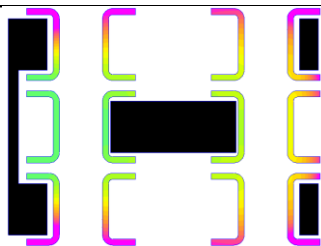
Číslo nože	I [A]
1-1	377,14
1-2	249,50
2-1	267,37
2-2	77,42
3-1	373,90
3-2	246,12
4-1	246,69
4-2	368,61
5-1	75,49
5-2	258,90
6-1	243,32
6-2	365,55



FM4

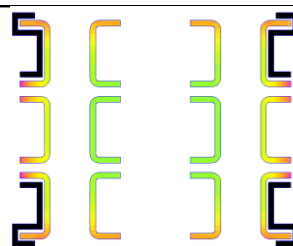
Číslo nože	I [A]
1-1	336,20
1-2	246,08
2-1	324,52
2-2	108,01
3-1	333,10
3-2	243,03
4-1	243,46
4-2	328,89
5-1	105,66
5-2	314,59
6-1	240,38
6-2	326,09





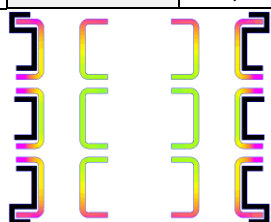
FM5

Číslo nože	I [A]
1-1	372,75
1-2	305,74
2-1	17,15
2-2	28,27
3-1	369,25
3-2	302,19
4-1	288,38
4-2	415,96
5-1	84,86
5-2	285,93
6-1	284,98
6-2	394,54



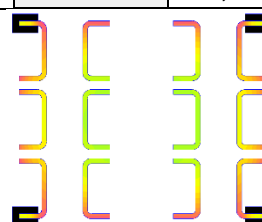
FM6

Číslo nože	I [A]
1-1	333,91
1-2	253,59
2-1	312,98
2-2	108,37
3-1	331,01
3-2	250,47
4-1	250,89
4-2	326,86
5-1	106,17
5-2	303,69
6-1	247,97
6-2	324,11



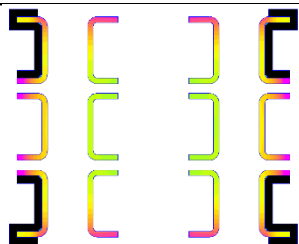
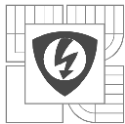
FM7

Číslo nože	I [A]
1-1	360,69
1-2	261,22
2-1	269,51
2-2	82,25
3-1	357,47
3-2	258,00
4-1	258,75
4-2	353,15
5-1	80,94
5-2	261,72
6-1	255,79
6-2	350,52



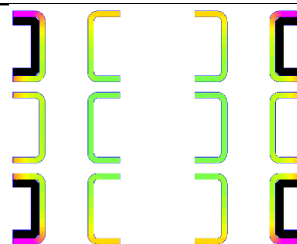
FM8

Číslo nože	I [A]
1-1	331,77
1-2	270,28
2-1	280,01
2-2	113,70
3-1	328,91
3-2	266,87
4-1	267,07
4-2	324,04
5-1	111,27
5-2	271,36
6-1	263,54
6-2	321,19



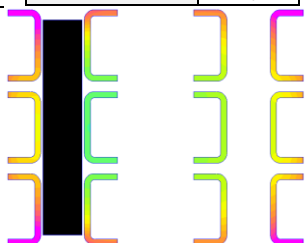
FM9

Číslo nože	I [A]
1-1	303,43
1-2	269,37
2-1	330,98
2-2	118,20
3-1	300,94
3-2	266,36
4-1	267,01
4-2	297,26
5-1	116,07
5-2	321,78
6-1	263,80
6-2	294,72



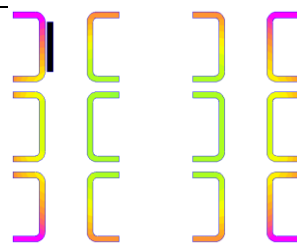
FM10

Číslo nože	I [A]
1-1	373,33
1-2	244,85
2-1	278,58
2-2	82,68
3-1	370,03
3-2	241,67
4-1	242,21
4-2	365,06
5-1	80,86
5-2	269,82
6-1	239,04
6-2	361,93



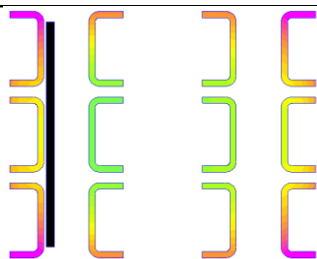
FM11

Číslo nože	I [A]
1-1	425,31
1-2	216,84
2-1	266,93
2-2	19,79
3-1	421,72
3-2	213,76
4-1	250,46
4-2	381,04
5-1	87,28
5-2	242,57
6-1	245,92
6-2	378,40



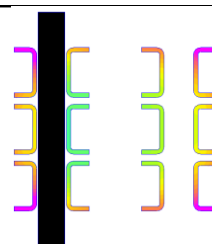
FM12

Číslo nože	I [A]
1-1	395,51
1-2	239,40
2-1	244,53
2-2	84,89
3-1	381,58
3-2	244,60
4-1	245,01
4-2	376,27
5-1	84,74
5-2	239,82
6-1	241,13
6-2	372,52



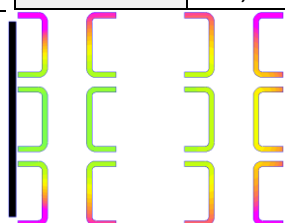
FM13

Číslo nože	I [A]
1-1	400,00
1-2	231,25
2-1	265,01
2-2	59,03
3-1	396,63
3-2	227,70
4-1	247,09
4-2	377,40
5-1	87,35
5-2	241,11
6-1	243,55
6-2	373,88



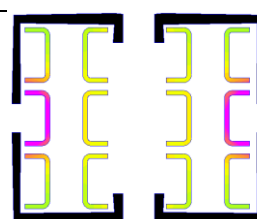
FM14

Číslo nože	I [A]
1-1	439,82
1-2	179,28
2-1	273,35
2-2	21,00
3-1	436,15
3-2	176,42
4-1	254,61
4-2	390,58
5-1	90,76
5-2	249,91
6-1	251,20
6-2	386,92



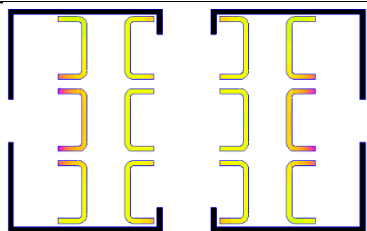
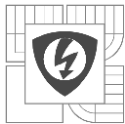
FM15

Číslo nože	I [A]
1-1	359,29
1-2	283,77
2-1	32,48
2-2	57,99
3-1	356,59
3-2	280,69
4-1	285,15
4-2	425,27
5-1	98,43
5-2	267,30
6-1	281,52
6-2	421,51



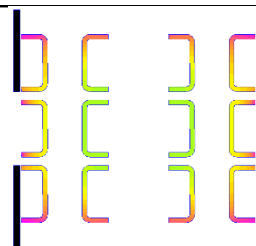
FM16

Číslo nože	I [A]
1-1	197,43
1-2	225,51
2-1	469,93
2-2	260,65
3-1	197,09
3-2	221,67
4-1	230,02
4-2	206,82
5-1	259,10
5-2	448,29
6-1	229,13
6-2	204,37



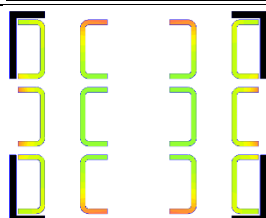
FM17

Číslo nože	I [A]
1-1	254,81
1-2	252,44
2-1	326,82
2-2	228,88
3-1	262,96
3-2	256,90
4-1	251,55
4-2	251,05
5-1	227,75
5-2	321,86
6-1	255,86
6-2	259,08



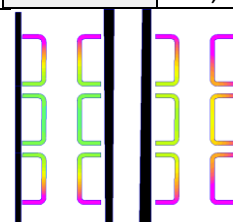
FM18

Číslo nože	I [A]
1-1	346,20
1-2	257,79
2-1	281,84
2-2	106,35
3-1	342,87
3-2	254,48
4-1	255,00
4-2	338,99
5-1	104,27
5-2	273,81
6-1	252,06
6-2	336,38



FM19

Číslo nože	I [A]
1-1	283,13
1-2	296,54
2-1	299,48
2-2	134,58
3-1	281,04
3-2	293,46
4-1	293,97
4-2	277,58
5-1	132,38
5-2	291,60
6-1	290,78
6-2	275,46



FM20

Číslo nože	I [A]
1-1	311,74
1-2	284,98
2-1	17,09
2-2	17,05
3-1	309,28
3-2	286,87
4-1	301,96
4-2	483,23
5-1	57,40
5-2	297,15
6-1	302,71
6-2	480,53

