

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Mědí pokryté hliníkové přípojnice**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub TOMEČEK**  
Osobní číslo: **E12B0070P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Mědi pokryté hliníkové přípojnice**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

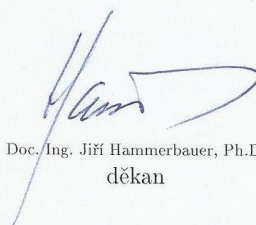
1. Zpracujte rešerši aktuálního stavu problematiky.
2. Pomocí simulace optimalizujte využití materiálů pro vybranou přípojnicí.
3. Zhodnoťte vlastnosti navržené přípojnice z hlediska použití v průmyslu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

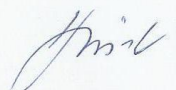
1. HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 436 s.
2. COMSOL product help.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jaroslav Šnajdr  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou přípojníc, konkrétně mědí pokrytých hliníkových přípojníc. Popisuje materiály, které slouží k jejich výrobě, dále vlastnosti a použití konkrétních typů přípojníc. Jednou z částí je přehled dvou současných výrobců a jejich nabídky. Ještě je uveden obecný náhled na elektromagnetické pole. V práci je popsána a realizována simulace pomocí programu Comsol několika konkrétních typů hliníkových přípojníc pokrytých mědí, řešených fyzikou magnetického pole.

## **Klíčová slova**

Mědí pokryté hliníkové přípojnice, systém přípojníc, elektromagnetické pole, maxwellovy rovnice, skinefekt, Jouleovy ztráty, koeficient střídavého odporu, Comsol

## **Abstract**

This thesis deals with the bus-bar , namely the copper clad aluminous bus-bars. It describes materials that are used to produce them, as well as the properties and using of specific types of bus-bars. One part is an overview of two current manufacturers and their offerings. There is still a general view of the electromagnetic field . The work is described and implemented by using the simulation program Comsol several specific types of copper clad aluminous bus-bar, solved the physics of magnetic fields.

## **Key words**

Copper clad aluminous bus-bars, busbar system, electromagnetic field, Maxwell's equations, skin effect, Joule losses, AC resistance coefficient, Comsol

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

.....

podpis

V Plzni dne: 3.6.2015

Jakub Tomeček

## **Poděkování**

Velice rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavu Šnajdrovi za umožnění vypracování této práce, za věnovaný čas a informace poskytnuté při konzultacích i po emailu. Za pomoc při řešení problémů při práci s programem COMSOL bych rád poděkoval Ing. Karlu Slobodníkovi.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>1 PŘÍPOJNICE</b> .....	<b>10</b>
1.1 VLASTNOSTI MATERIÁLŮ PŘÍPOJNIC .....	10
1.2 MATERIÁLY PŘÍPOJNIC .....	11
1.3 SYSTÉMY PŘÍPOJNIC.....	12
1.3.1 Jednoduchý systém přípojnic .....	13
1.3.2 Dvojitý systém přípojnic.....	13
1.3.3 Trojitý systém přípojnic .....	14
1.3.4 Pomocný a polygonový systém přípojnic .....	15
1.4 PŘÍPOJNICOVÝ SYSTÉM SIVACON FIRMY SIEMENS .....	17
1.4.1 Typ CD-K.....	18
1.4.2 Typ BD01 .....	18
1.4.3 Typ BD2 .....	19
1.4.4 Typ LD .....	19
1.4.5 Typ LX.....	20
1.4.6 Typ LR.....	20
1.5 PŘÍPOJNICOVÝ SYSTÉM MEMPOWER FIRMY EATON .....	21
1.5.1 Lux lighting .....	21
1.5.2 Low power LP.....	21
1.5.3 Medium power MP.....	22
1.5.4 Low impedance XP .....	23
<b>2 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE</b> .....	<b>23</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VZTAHY .....	24
2.2 PODMÍNKY NA ROZHŘANÍ .....	24
2.3 MAXWELLOVY ROVNICE.....	25
2.3.1 První MR (Ampérův zákon).....	25
2.3.2 Druhá MR (Faradayův indukční zákon) .....	26
2.3.3 Třetí MR (Gaussův zákon elektrostatiky).....	26
2.3.4 Čtvrtá MR (Zákon kontinuity magnetického indukčního toku).....	26
2.3.5 Vektorový magnetický potenciál .....	27
2.4 VÍŘIVÉ PROUDY .....	27
2.5 JEVY OVLIVŇUJÍCÍ ROZLOŽENÍ PROUDOVÉ HUSTOTY .....	28
2.5.1 Proximity efekt .....	28
2.5.2 Skinefekt .....	28
<b>3 COMSOL MULTIPHYSICS</b> .....	<b>30</b>
3.1 POSTUP PŘI REALIZACI MODELŮ .....	32
3.2 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....	35
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>38</b>



## Seznam symbolů a zkratek

G	elektrická vodivost	S
Q	elektrický náboj	C
R	elektrický odpor	$\Omega$
Al	hliník	
$U_i$	indukované napětí	V
H	intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
$\sigma, \gamma$	konduktivita	$S \cdot m^{-1}$
B	magnetická indukce	T
$U_m$	magnetické napětí	A
$\Phi$	magnetický indukční tok	Wb
A	magnetický vektorový potenciál	$Wb \cdot m^{-1}$
MR	maxwellovy rovnice	
Cu	měď	
Cuponal	mědí pokrytý hliníkový profil	
$\rho$	měrný elektrický odpor	$\Omega \cdot m$
$\mu$	permeabilita	$H \cdot m^{-1}$
$\mu_r$	permeabilita relativní	
$\mu_0$	permeabilita vakua	$H \cdot m^{-1}$
$\epsilon$	permitivita	$F \cdot m^{-1}$
$\epsilon_r$	permitivita relativní	
$\epsilon_0$	permitivita vakua	$F \cdot m^{-1}$
J	proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
$J_e$	proudová hustota (externí)	$A \cdot m^{-2}$
$\nabla$	rotace	
v	rychlost	$m \cdot s^{-1}$
ss	stejnoseměrný proud	
st	střídavý proud	
$\omega$	úhlová rychlost	$rad \cdot m^{-1}$
$\times$	vektorové násobení	

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce obsahuje shrnutí aktuálního stavu přípojnic. Dále pak simulace rozložení proudové hustoty vlivem elektromagnetického pole pro několik typů těchto přípojnic. Výsledky simulací slouží k představě dané problematiky.

V první kapitole jsou uvedeny běžně užívané materiály přípojnic i jejich možní nástupci, u nichž jsou zhodnoceny dobré a horší vlastnosti. Kapitola dále pojednává o významu přípojnic a jejich různorodému použití. Z hlediska významu je popisováno užití v rozvodnách, kde se systém dělí na jednoduchý, dvojité, trojitý, pomocný a polygonový. V aplikacích je užit typ pasových a sendvičových přípojnic. Je zde také představen přípojnicový systém firmy Siemens a konkurenční firmy Eaton. Tyto firmy disponují systémy od osvětlení, až po výkonově náročné aplikace.

V druhé kapitole je popsáno elektromagnetické pole se zavedením příslušných vztahů, které ho charakterizují. Také jsou zde objasněny jevy, které elektromagnetické pole způsobuje.

V třetí kapitole je v programu Comsol Multiphysics nasimulováno několik typů přípojnic, kde se mění poměr hliník měď při zachování konstantního průřezu. Data ze simulací jsou použity pro vytvoření grafů, které slouží k zhodnocení Jouleových ztrát a také pro porovnání koeficientu střídavého odporu.

# 1 Přípojnice

Přípojnice se používají k přenosu a rozvodu elektrické energie a mají širokou oblast použitelnosti v nejrůznějších provozních podmínkách a prostředích a to od rozvodu energie, po aplikaci v rozvodných zařízeních. V zařízeních NN a VN se provádí jako holé ploché nebo profilované tyče, ve VVN dnes už přechází na využívání trubkových vodičů. Vzdálenost jednotlivých fázových vodičů a průřez přípojnice jsou dány zatěžovacím napětím a proudem v běžném provozu tak i v poruchovém stavu, kdy dochází k daleko většímu dynamickému a tepelnému namáhání, způsobené zkratovým proudem.

V případě značného proudového zatížení se používá paralelních plochých tyčí (sendvičové přípojnice) zpevněných rozpěrkami. U zařízení NN mohou mít přípojnice odstupňovaný průřez podle skutečného proudu, který jimi v jednotlivých úsecích protéká. Zmenšený průřez se v tomto případě nejistí [3].

## 1.1 Vlastnosti materiálů přípojnic

Mezi nároky na materiál přípojnic patří dobré elektrické, mechanické a chemické vlastnosti. Vyžadujeme minimální elektrický odpor  $R = \rho \frac{l}{S}$  [ $\Omega$ ], nejvyšší elektrickou vodivost  $G = \sigma \frac{S}{l}$  [S], která je převrácenou hodnotou el. odporu, kde  $\sigma$  - konduktivita vodiče,  $\rho$  - rezistivita vodiče,  $S$  - obsah průřezu vodiče,  $l$  - délka vodiče. Elektrická vodivost a odpor jsou závislé na teplotě (vodivost s přibývajícím teplotou klesá a odpor stoupá). V praxi stanovujeme měrný el. odpor  $\rho$ , který je dán vztahem  $\rho = \frac{l}{\sigma}$  [ $\Omega\text{m}$ ]. Požadujeme co nejmenší rezistivitu, která se u kovů pohybuje okolo  $10^{-8}$  až  $10^{-5}$   $\Omega\text{m}$ . Měrná elektrická vodivost  $\sigma = \frac{lG}{S}$  [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ], vodivých materiálů je způsobena volnými elektrony. Skupenství pevných vodičů má polykrystalickou mřížku s malým počtem valenčních elektronů. Valence mezi valenčními elektrony a jádry atomů jsou velmi slabé, dochází k neuspořádanému pohybu volných elektronů. Připojené napětí na okraje materiálu částice uspořádá ve směru intenzity elektrického pole  $E$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] [1].

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Určována součinitelem tepelné vodivosti  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] jako množství tepla, které musí za jednotku času projít tělesem, aby na jednotkovou délku byl jednotkový teplotní spád ( $1\text{ }^\circ\text{C}/1\text{ m}$ ). Přitom se předpokládá, že teplo se šíří pouze v jednom směru [14].

U vodičů se dělají určité typové mechanické zkoušky. Především je požadována co největší pevnost v tahu určující, jak velkou silou je možno působit, aby nedošlo k mechanickému poškození. Míra tuhosti materiálu je odolnost proti deformačním účinkům sil. Dalším kritériem je mez pružnosti, která udává hodnotu tahového napětí, kdy už je překročena hranice pružné deformace a nastává trvalá deformace materiálu. Termín únava materiálu je zapříčiněna cyklickým namáháním, dochází ke změně nebo porušení vlastností hmoty. A další typy mechanických zkoušek [1][5].

Důležitým parametrem je odolnost vůči korozi. Koroze je obrovským problémem pro majoritu kovů. Vlhkost vzduchu napomáhá k rozrušování struktur materiálů a může způsobit poruchy, které mohou působit škody. Přistupuje se k povrchovým úpravám materiálů k jejich eliminaci. U hliníku se vytváří nevodivá vrstva oxidu a u mědi měděnka [1][3].

## 1.2 Materiály přípojnic

Pro výrobu přípojnic se nejčastěji užívají materiály jako je měď, hliník a cuponal. Volba materiálu je úzce spojena s aplikací přípojnice. A to na základě jejich vlastností, technických parametrů a v neposlední řadě ekonomické výhodnosti.

Z pohledu požadovaných materiálových vlastností je skoro ve všem výhodnější měď. Měď disponuje výbornými elektrickými vlastnostmi. Lepší má už pouze stříbro. Rezistivity mědi spadá k nejnižším z veškerých kovů. Odolnost proti korozi je podstatným parametrem. Měď pokrývá ochranná vrstva měděnky, vznikající působením oxidu uhličitého, vzduchu a vlhkosti [5].

Elektrické vlastnosti hliníku horší než u mědi. Pro docílení shodných elektrických vlastností jako u mědi, je nutno zesílit průřez vodiče. Nicméně je to značně dobrý vodič, výhodnější pro mnohé aplikace (vedení → AlFe lana). Výhodami hliníku jsou cena a jeho nižší hustota, která vykazuje nižší hmotnost. Proto nosné součásti zařízení se mohou dimenzovat na nižší zatížení. Vyrábí se z horniny bauxitu, je dobře tažný, málo pevný, nekřehne při snižování teploty. Na vzduchu nadměru odolný, pokryt vrstvičkou kysličníku hlinitého  $Al_2O_3$ , která povrch chrání a zamezuje jeho další degradaci [1][7].

Cuponal je materiál ze dvou kovů Cu a Al (bimetal), který slučuje jejich vlastnosti. Vrstva mědi je pod vysokým tlakem nanášena na hliníkové jádro. Průchod střídavého proudu doprovází povrchový jev nazývaný skin efekt (nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v

průřezu vodiče). V místě s větší proudovou hustotou (vlivem skin efektu) je materiál s vyšší elektrickou vodivostí (Cu). Cuponal má ještě následující výhody. Snižuje náklady až o 40% oproti mědi. Oproti mědi je úspora i v hmotnosti a to až o 60%, protože část je tvořena lehčím hliníkem. Disponuje lepšími elektrickými vlastnostmi než hliník [5][8].



Obr. č. 1 – Cuponal [8]

V tabulce jsou parametry nejpoužívanějších materiálů pro přípojnice:

		Měď	Hliník	Cuponal
Rezistivita	[mΩ/cm]	$1,72 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-8}$	$2,65 \times 10^{-8}$
Elektrická vodivost	[S/m]	$58 \times 10^6$	$35,4 \times 10^6$	$37,7 \times 10^6$
Hustota při 20°C	[kg/m <sup>3</sup> ]	$8,89 \times 10^3$	$2,7 \times 10^3$	$3,63 \times 10^3$
Koeficient roztažnosti	[1/°C]	$17 \times 10^{-6}$	$23 \times 10^{-6}$	$21,9 \times 10^{-6}$
Minimální pevnost v tahu	[MN/m <sup>2</sup> ]	200-300	50-100	60
Teplotní součinitel odporu	[1/°C]	$3,93 \times 10^{-3}$	$4,03 \times 10^{-3}$	$4,01 \times 10^{-3}$
Měrná tepelná kapacita	[J/kg°C]	393,5	921,1	711,7
Tepelná vodivost při 20°C	[W/m°C]	385	237	238
Bod tání	[°C]	1083	658	658

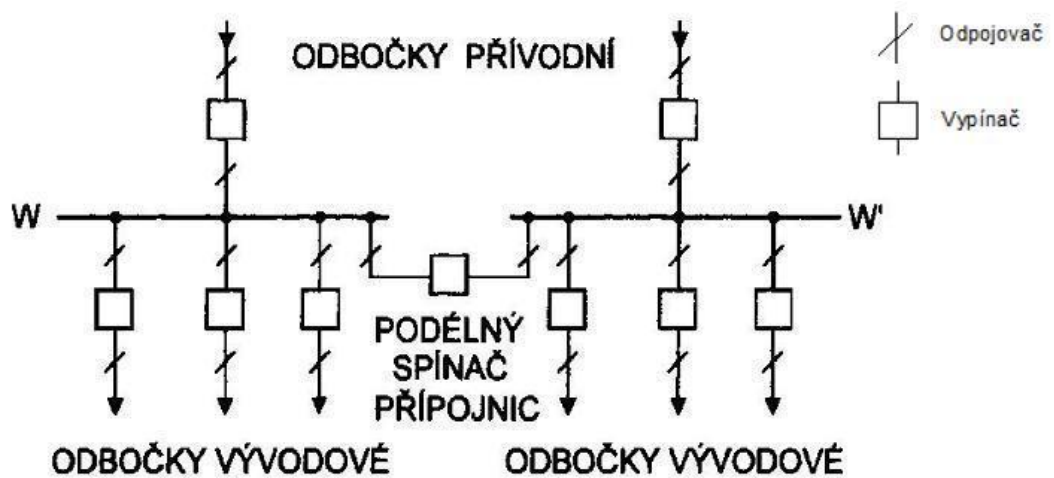
Tab. č. 1 – Hodnoty parametrů vodičů [5]

### 1.3 Systémy přípojnic

Přípojnicový systém je soubor  $n$  fází. Použit přípojnice lze prakticky v jakékoliv aplikaci. Na hladinách VVN se používají obvykle lanové, nebo trubkové. Na VN pak zpravidla masivní. Dnes je trendem v některých případech použít přípojnice s hliníkovým jádrem a měděným pláštěm (tzv. *copper clad aluminium bus-bars*), které mají několik jedinečných vlastností vůči běžně užívaným materiálům. Následující část je čerpána ze zdrojů [4] [6].

### 1.3.1 Jednoduchý systém přípojnic

System lze použít tam, kde není požadavek na stálý chod při revizích a opravách. Především se používá v rozvodných zařízeních, ze kterých jsou napájeny spotřebiče, jejichž vyřazení z činnosti nemá vliv na bezpečnost osob a nezpůsobuje ekonomické ztráty. K výhodám patří přehlednost, jednoduchost, snadná obsluha a nízké náklady na vybudování. Nevýhodou je, že každá revize nebo porucha systému vyřadí rozvodnu z chodu. Pro zajištění napájení musíme použít dvou zdrojů, přípojnice rozdělí podélně pomocí podélného spínače nebo pomocné přípojnice, ale tu jen v případě dimenzování rozvodny pro paralelní chod zdrojů, jinak to lze vyřešit blokováním spínače proti zapnutí obou zdrojů zároveň.



Obr. č. 2 - Jednoduchý systém přípojnic [4]

Podélný spínač lze realizovat odpojovačem nebo vypínačem. Odpojovač není konstruován na spínání a vypínání při zatížení, proto se používá vypínač, který lze spínat i vypínat pod zatížením.

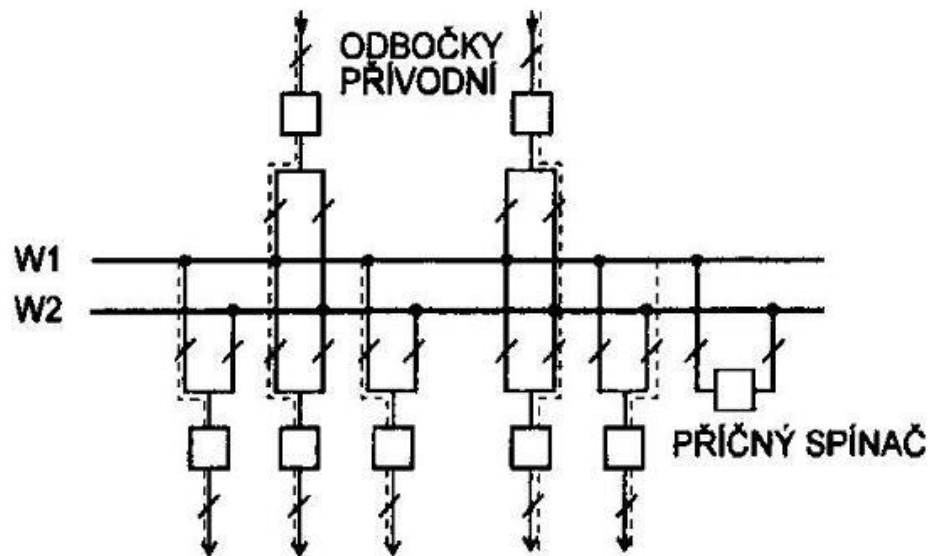
### 1.3.2 Dvojitý systém přípojnic

Dvojité přípojnice jsou použity tam, kde není možno při revizi přípojnic přerušit dodávky. Nebo kde provoz odboček je nutno rozdělit do dvou částí z některých následujících příčin:

- omezení zkratových proudů rozdělením zdrojů
- souběžné napájení ze dvou nespolupracujících zdrojů
- separování zařízení nestálého příkonu od zařízení, které požadují stabilní napětí
- oddělení sítě s venkovním vedením od sítě kabelové

- zabezpečení důležitých odběrů při výpadku některých zdrojů zbývajícími zdroji menšího výkonu

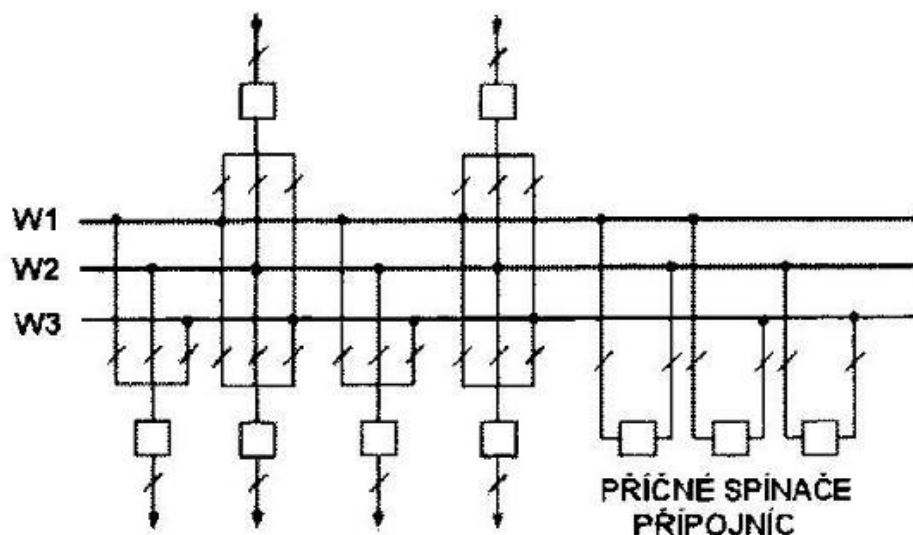
Tento systém musí být vybaven příčným spínačem, aby se přepojování odboček na druhý systém bylo schopno realizovat bez přerušení činnosti. Ovládat přípojnicový odpojovač druhého systému při zapnutých odbočkách na první jde jen při sepnutém spínači přípojnic.



Obr. č. 3 - Dvojitý systém přípojnic [4]

### 1.3.3 Trojitý systém přípojnic

Trojitého systému přípojnic se používá nejčastěji u sítí 110kV s velkým počtem odboček a také tam, kde musí být dva oddělené systémy přípojnic neustále v provozu a pro revizi přípojnic není povoleno krátkodobé vyřazení z chodu. Tam, kde potřebujeme oddělit zdroje z důvodu ovlivnění velkých zkratových nebo provozních proudů, aby nedocházelo k ovlivňování soustav mezi sebou, je nutné provozovat síť stejného napětí separovaně s ohledem na důležitost provozu.

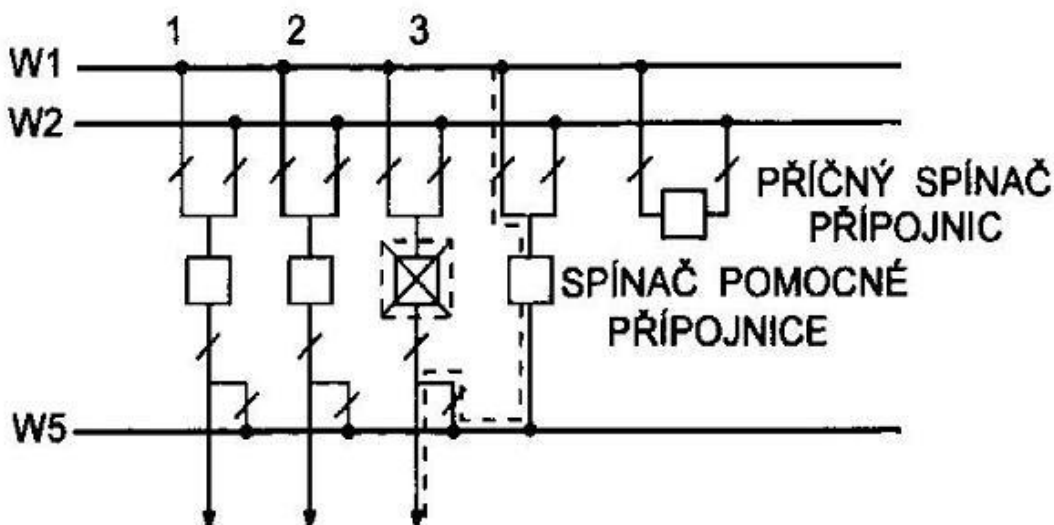


Obr. č. 4 - Trojitý systém přípojnic [4]

### 1.3.4 Pomocný a polygonový systém přípojnic

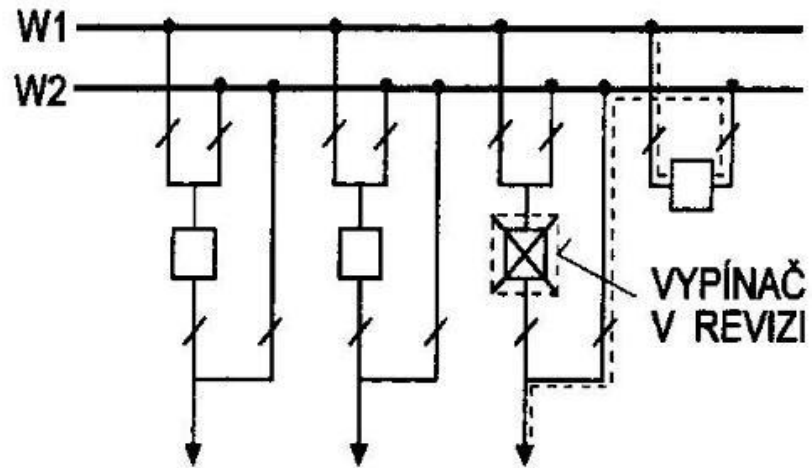
Pomocný systém přípojnic se používá v případě, kde nelze dovolit odstavení odbočky po celou dobu údržby vypínače nebo zařízení k němu náležejících (měřicí transformátory, el. ochrany, ovládací, signalizační a měřicí obvody). Pak tímto systémem vedeme všechny výkon této odbočky. Nebo se také používá by-pass, přes který se provozuje odstavená odbočka. Dimenzují se stejně, jako nejsilnější odbočka.

Když je odbočka připojena přes pomocnou přípojnici, tak jde o náhradní provoz. Na pomocnou přípojnici lze připojit pouze jedna odbočka, aby byl provoz zajištěn při normálním i poruchovém stavu.



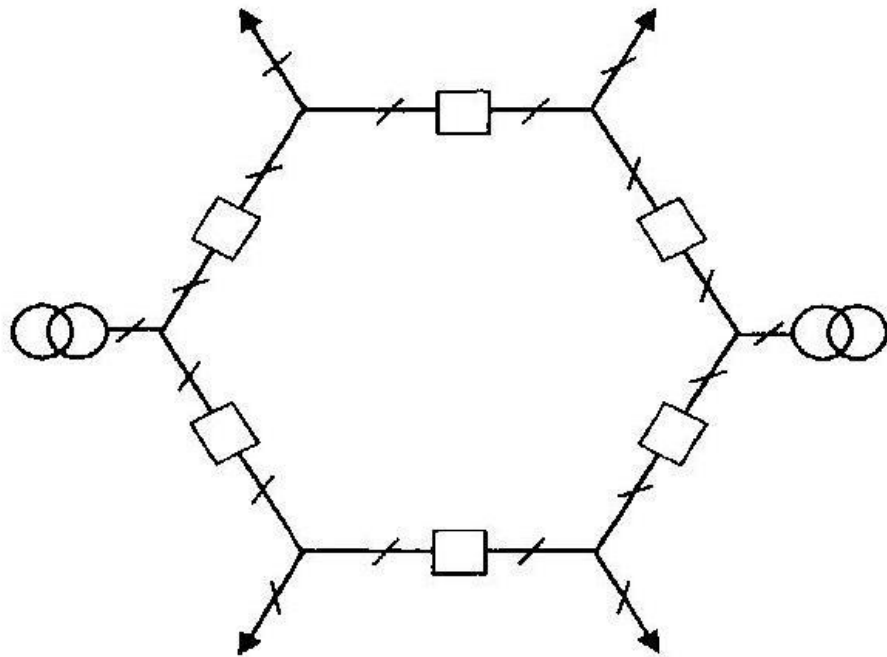
Obr. č. 5 - Pomocný systém přípojnic [4]





Obr. č. 6 - Systém přípojnic s by-passem [4]

Polygonová zapojení přípojnic tam, kde se požaduje omezení následků zkratů v rozvodně na minimální počet odboček. Sice jsou nejspolehlivějšími zapojeními, ale přesto málo používanými. Jejich konstrukční řešení i následné rozšiřování a nastavování elektrických ochran je obtížné [4][6].



Obr. č. 7 - Polygonové zapojení přípojnic [4]

## 1.4 Přípojnicový systém Sivacon firmy Siemens

Jednotlivé typy přípojnicového systému Sivacon 8PS se od sebe liší hodnotou přenášeného jmenovitého proudu, konstrukcí, krytím, konfigurací proudovodných drah a dalšími aspekty. Díky své sendvičové konstrukci je systém schopen přenášet velké množství energie s minimálním úbytkem napětí. Samozřejmostí je vysoká odolnost proti zkratovým proudům, která přesahuje hodnoty napájecího zdroje. Jejich společné vlastnosti jsou nadstandardní bezpečnost při provozu i obsluze, přizpůsobivost stavebním dispozicím, snadná montáž a rovněž jednoduchost při požadovaných dodatečných změnách.

Z hlediska ekonomického jsou počáteční pořizovací náklady na přípojnice o něco vyšší než u běžných kabelů, ale investice spojené s montáží přípojnic jsou naopak nižší, takže v celkovém součtu vychází porovnání použití přípojnic a běžných kabelů přibližně stejně. K výhodám patří tyto aspekty:

- **Možnost dalšího upravování rozvodu podle potřeby**

Je možnost přidání či přemístění odběru, u kabelizace se řeší složitě.

- **Minimální prostorové požadavky**

Pro přenos stejného jmenovitého proudu je třeba menší prostor než u kabelů.

- **Nadstandardní vlastnosti v základním provedení**

Oproti kabelům mají přípojnice menší požární zátěž, větší požární odolnost, větší bezpečnost při provozu i obsluze (na odbočných místech lze bezpečně pracovat bez nutnosti vypnutí napájecího celku).

- **Bezúdržbovost systému**

Pro přípojnicové systémy je vydáván certifikát, který prokazuje, že po namontování podle předepsaných postupů není třeba opakovaně dotahovat spoje, což předepisují normy (platí to i pro proudovodné dráhy z hliníku).

- **Snadné projektování**

Umožňuje již ve fázi prováděcí dokumentace řešit případné kolize, a minimalizovat tak pozdější dodatečné náklady spojené s koordinací na místě realizace.

- **Rychlá a jednoduchá montáž**

Bez složitých postupů, bez nutnosti použití techniky, jen se sadou „gola“, popř. šroubovákem, je možné s několika málo elektroinstalatéry za poměrně krátkou dobu snadno vybudovat rozvodné trasy.

### 1.4.1 Typ CD-K

Je to systém určený pro proudy do 40A. Je vhodný zejména pro distribuci energie přímo u samotných spotřebičů nebo pro zavěšení standardních světelných zdrojů. V jednom zapouzdření lze zdvojit na dva nezávislé okruhy (hlavní a nouzové osvětlení).



Obr. č. 8 – Systém CD-K určený pro světelné zdroje [9]

### 1.4.2 Typ BD01

Tento typ je konstruován pro proudy od 40A do 160A. Díky svým elektrickým vlastnostem je používán k napájení podružných rozvodů a pro přímé napájení spotřebičů s vyšším příkonem, například v dílnách, laboratořích nebo výrobních linkách. U tohoto typu na přání zákazníka lze libovolně konfigurovat odbočné skřínky s třípólovými, pětípólovými zásuvkami, chráněnými jističi, popřípadě pojistky i proudovými chrániči. Je zabráněno nebezpečnému dotyku při nasazování a snímání odbočné skříně, odbočná místa jsou zakryta blokovanými kryty.



Obr. č. 9 - Systém BD01 pro vyšší výkony [9]

### 1.4.3 Typ BD2

Jeho velmi pevná a tuhá konstrukce je optimalizována pro přenos a distribuci proudů od 160A do 1250A. Je vhodný do průmyslových hal a veřejných budov. Zde je možnost volby průřezu a materiálu proudovodných drah. Odbočné skřínky lze vybavit různými přístrojovými doplňky s libovolnou funkcí, to jsou třeba stykače, chrániče, měřiče energie apod..



Obr. č. 10 - Systém BD2 [9]

### 1.4.4 Typ LD

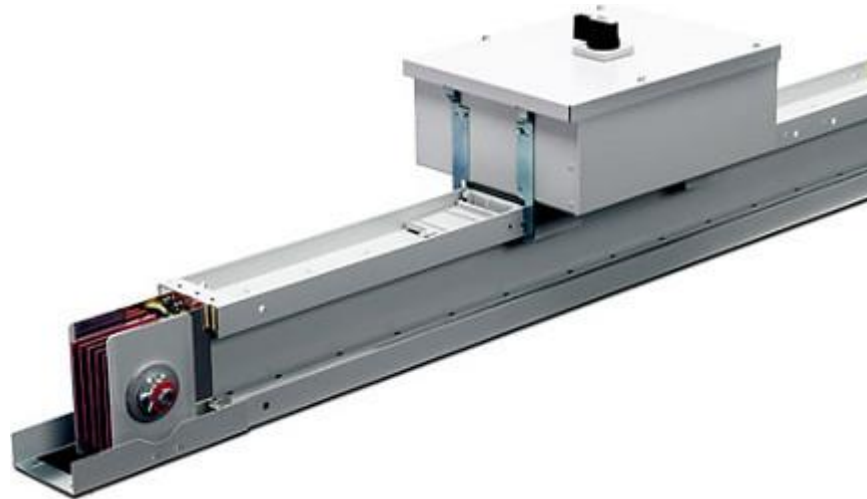
Toto je tzv. ventilační konstrukce, která je mnohými náročnými aplikacemi prověřená. Je konstruována na proud do 5000A a nemá velké požadavky na prostor. Průřez trasy je 240×180 mm. Je možno volby konfigurace proudovodných drah. Odbočkové skříně lze dodat s pojistkovým odpojovačem do 630A nebo výkonovým jističem do 1250A.



Obr. č. 11 - Systém LD [9]

### 1.4.5 Typ LX

Sendvičové řešení přípojnic pro jmenovité proudy od 800A do 6300A. Vhodné pro komerční centra a výškové budovy. Také zde je možnost volby průřezu a materiálu proudovodných drah.



Obr. č. 12 - Systém LX [9]

### 1.4.6 Typ LR

Tato konstrukce přípojnic lze kombinovat se systémem LX, třeba při přechodu z venkovních do vnitřních prostor. Vyniká vysokým krytím IP68 pro proudy od 630A do 6300A. Díky vysokému krytí je vhodná pro prostory trvale mokré a znečištěné agresivními látkami.



Obr. č. 13 - Systém LR [9]

Uvedené typy je možné na přání zákazníka doplnit slaboproudými sběrnými prostory pro možnost dálkového řízení, sledování či signalizace [9].

## 1.5 Přípojnicový systém Mempower firmy Eaton

Mempower vyvinul hospodárnou a spolehlivou řadu přípojnicových systémů, která je schopna se přizpůsobit prakticky jakékoliv instalaci. Konstrukce tvoří elegantní a atraktivní alternativu ke kabelům i jiným typům přípojníc, zajišťuje také flexibilitu a snadnou instalaci v krátkém čase. Díly z hliníku či mědi s hliníkovým zapouzdřením o nízké hmotnosti jsou metrové až třímetrové podle typu, čímž umožňují poskytnout odbočná místa tam, kde je potřeba. Vyrábí se ve verzích pro osvětlení až po vysoké výkony a jejich jmenovité proudy od 25 do 6300A.

### 1.5.1 Lux lighting

Tato bohatě vybavená řada pro osvětlení je k dispozici do 63A. Především se používá pro závěsnou montáž a je vhodná pro použití v kancelářích, hotelech, maloobchodních prodejnách i obchodních centrech. Přípojnice jsou k dispozici v 6ti a 4pólovém uspořádání s odbočným místem na každém metru délky standardního třímetrového přímého dílu. Stupeň krytí IP41 nebo IP55. Jednoduchá instalace bez požadavků na sešroubování dílů a jde použít i spoj pro výškové a směrové změny. Lze dodávat s připevněným kabelem nebo bez něho.



Obr. č. 14 - Systém Lux lighting [11]

### 1.5.2 Low power LP

Řada přípojníc pro nízké výkony pokrývá jmenovité proudy do 125A. Jsou určeny na zavěšení, upevnění na stěnu nebo pod podlahu. Díly jsou standardní délky, doplněny výběrem kolen a křížení, což zajišťuje uspořádání struktury instalace podle požadavků. Tato

měděná 5ti vodičová konfigurace s krytím IP4X má vestavěný oddělený nulový a uzemňovací vodič. Odbočné vývody po třetině metru s odbočnými skříňkami vybavenými modulárními jističi jsou vhodné pro kanceláře, banky, počítačová centra a průmyslové osvětlovací aplikace.



Obr. č. 15 - Systém Low power [11]

### 1.5.3 Medium power MP

Systém společnosti Eaton je k dispozici pro jmenovitý proud do 800A a používá se jako napájecí systém pro řadu LP nebo pro vertikální stoupací vedení. Tato měděná 5ti vodičová, tří fázová přípojnice s odděleným plným nulovým vodičem a vestavěným uzemňovacím vodičem je vhodná pro instalaci v hotelech, obchodních domech, nemocnicích, kancelářích a průmyslových elektrických vedeních. Konstrukce s krytím IP4X nebo IP54 umožňuje provést snadné změny v uspořádání. Řada obsahuje připojovací praporce, kolena a odbočné skřínky vybaveny výkonovými jističi, modulárními jističi nebo pojistkovými odpínači.



Obr. č. 16 - Systém Medium power [11]

### 1.5.4 Low impedance XP

Přípojnicový systém se sendvičovou konstrukcí je navržen s nízkou impedancí pro vysoké výkony o jmenovitém proudu od 500 do 6300A. Přípojnice je jak hliníková tak i měděná s krytím IP4X nebo IP54. Hliníkové jsou po celé délce poniklovány a pocínovány. Kolena, odbočné skříňky a připojovací praporce samozřejmostí. Spojování je řešeno spojovacím svorníkovým blokem se střížným šroubem a nejsou potřeba speciální díly kvůli tepelné roztažnosti. Konfigurace od 3 vodičové po 6ti vodičové uspořádání s mylarovou vinutou izolací třídy B 130°C. Tento přípojnicový systém obstál v nezávislé zkoušce požární celistvosti [11].



Obr. č. 17 - Systém Low impedance [11]

## 2 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole vzniká v prostoru a může se s časem měnit. Pokud je elektromagnetické pole časově proměnné (*nestacionární*), nelze řešit elektrické a magnetické jevy zvlášť, protože jsou vzájemně vázány. Když se pole mění s časem podle kosinové nebo sinové funkce, říkáme mu *harmonické* pole, když se mění dost pomalu, říkáme mu *kvazistacionární* pole. Základní zákony nestacionárního elektromagnetického pole vyjadřují Maxwellovy rovnice a materiálové vztahy [10].



## 2.1 Základní pojmy a vztahy

Elektromagnetické pole je charakterizováno základními veličinami, intenzitou elektrického pole  $\mathbf{E}$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] a magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$  [T]. Je-li pole ve vakuu, jsou tyto veličiny postačující. V látkovém prostředí zavádíme ještě dvě vektorové veličiny elektromagnetického pole, elektrickou indukci  $\mathbf{D}$  [ $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ], intenzitu magnetického pole  $\mathbf{H}$  [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ] a hustotu elektrického proudu  $\mathbf{J}$  [ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ].

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E} \qquad \mathbf{H} = \frac{1}{\mu}\mathbf{B} \qquad \mathbf{J} = \gamma\mathbf{E}$$

**Dielektrika** zastupuje permitivita  $\varepsilon$  udávající jejich izolační vlastnosti, popisující spojitost mezi vektory elektrické indukce a intenzity. Je dána vztahem  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ , kde permitivita vakua je  $\varepsilon_0 = 8,854\text{e}^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$  a relativní permitivita  $\varepsilon_r$  je bezrozměrná a říká, kolikrát se elektrická síla zvětší v případě, že těleso s elektrickým nábojem je místo ve vakuu umístěno v látkovém prostředí. Pro vakuum je  $\varepsilon_r = 1$ , pro vzduch je  $\varepsilon_r \approx 1$  a pro další dielektrika  $\varepsilon_r > 1$ .

**Magnetika** popisuje permeabilita  $\mu$ . Je to veličina, která vyjadřuje vliv materiálu nebo prostředí na výsledné účinky působícího magnetického pole. Je dána vztahem  $\mu = \mu_0 \mu_r$ , kde permeabilita vakua je  $\mu_0 = 4\pi\text{e}^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$  a relativní permeabilita  $\mu_r$  je bezrozměrná, podle které se rozdělují materiály na feromagnetické, paramagnetické a diamagnetické. Pro paramagnetické (např.: hliník, platina, cín) a diamagnetické (např.: měď, zlato, stříbro) látky zpravidla počítáme s  $\mu_r \approx 1$ . U feromagnetických látek  $\mu_r \gg 1$  (např.: železo, kobalt, nikl  $\mu_r \rightarrow 10^1$  až  $10^5$ ). Často počítáme s dokonalým feromagnetikem, jehož permeabilita  $\mu \rightarrow \infty$ .

**Vodiče** jsou charakterizovány konduktivitou  $\sigma$ , vlastnost materiálu vést proud. U kovových vodičů se hodnoty vodivosti pohybují okolo  $10^6$  až  $10^8 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ , u polovodičů  $10^{-8}$  až  $10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ , u izolantů  $10^{-19}$  až  $10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ . Dokonalí vodič  $\sigma \rightarrow \infty$ , dokonalí izolant  $\sigma \rightarrow 0$  [10][15].

## 2.2 Podmínky na rozhraní

Složky vektorů ( $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{J}$ ) na rozhraní dvou prostředí nebo materiálů se musí rovnat, jejich indexy znázorňují, zda jde o složku normálovou či tečnou.

$$\mathbf{E}_{1t} = \mathbf{E}_{2t} \qquad \mathbf{D}_{1n} - \mathbf{D}_{2n} = \sigma_0 \qquad \mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n} \qquad \mathbf{H}_{1t} - \mathbf{H}_{2t} = \mathbf{J}_t \qquad \mathbf{J}_{1n} = \mathbf{J}_{2n}$$

## 2.3 Maxwellovy rovnice

MR jsou základními zákony elektromagnetického pole. Vznikly zobecněním Faradayových experimentů, které jsou praxí potvrzeny. Jdou stanovit v integrálním tvaru rovnic, popisují elektromagnetické pole v určité oblasti a v diferenciálním tvaru v jistém bodě této oblasti. Diferenciální tvar rovnic, se uplatňuje ve výpočtech. Vliv časové proměnnosti se výrazně uplatňuje u první a druhé MR. Z těchto rovnic plyne, že v nestacionárním případě jsou elektrické a magnetické jevy spolu vázány. Následující popis integrálního a diferenciálního tvaru MR je čerpán ze zdroje [10, s. 32 - 37].

	Integrální tvar	Diferenciální tvar
1. Maxwellova rovnice	$\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
2. Maxwellova rovnice	$\oint_c \mathbf{E} \, d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$	$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
3. Maxwellova rovnice	$\oint_S \mathbf{D} \, d\mathbf{S} = Q$	$\text{div } \mathbf{D} = \rho$
4. Maxwellova rovnice	$\oint_S \mathbf{B} \, d\mathbf{S} = 0$	$\text{div } \mathbf{B} = 0$

Tab. č. 2 - Maxwellovy rovnice [10]

### 2.3.1 První MR (Ampérův zákon)

- **Integrální tvar**  $\oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} = I + \frac{d\Psi}{dt}$

„Cirkulace vektoru  $\mathbf{H}$  po libovolné orientované křivce  $c$  je rovna součtu celkového proudu a posuvného (Maxwellova) proudu  $\frac{d\Psi}{dt}$ . Oba proudy jsou spřaženy s křivkou  $c$ . Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , kterou křivka  $c$  ohraničuje, jsou vzájemně orientovány pravotočivě.“ Magnetické napětí  $\mathbf{U}_m = \oint_c \mathbf{H} \, d\mathbf{l} \Rightarrow \mathbf{U}_m = I + \frac{d\Psi}{dt}$  [A].

- **Diferenciální tvar**  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$

„Rotace vektoru intenzity magnetického pole  $\mathbf{H}$  je rovna hustotě proudu  $\mathbf{J}$  a veličině  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ , kterou nazýváme hustotou Maxwellova (posuvného) proudu. Magnetické pole je obecně vírové (nepotenciální).“

### 2.3.2 Druhá MR (Faradayův indukční zákon)

- **Integrální tvar**  $\oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi}{dt}$  kde  $\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}$

„Cirkulace vektoru  $\mathbf{E}$  po libovolné orientované uzavřené křivce  $c$  je rovna záporně vzaté derivaci magnetického indukčního toku spřaženého s křivkou  $c$ . Křivka  $c$  a libovolná plocha  $S$ , kterou křivka  $c$  ohraničuje, jsou vzájemně orientované pravotočivě.“ Indukované napětí  $\mathbf{U}_i = \oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \Rightarrow \mathbf{U}_i = - \frac{d\Phi}{dt}$  [V].

- **Diferenciální tvar**  $\mathbf{rot} \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

„Rotace vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$ , je rovna časové derivaci vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Zákon elektromagnetické indukce patří k nejdůležitějším zákonům elektromagnetismu. Elektrické pole je obecně vírové (nepotenciální).“

### 2.3.3 Třetí MR (Gaussův zákon elektrostatiky)

- **Integrální tvar**  $\oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q$  kde  $Q = \int_V \rho dV$

„Elektrický indukční tok libovolnou vně orientovanou uzavřenou plochou  $S$  je roven celkovému volnému náboji v prostorové oblasti  $V$  ohraničenou plochou  $S$ .“

- **Diferenciální tvar**  $\mathbf{div} \mathbf{D} = \rho$

„Divergence vektoru elektrické indukce  $\mathbf{D}$  je rovna objemové hustotě volného náboje  $\rho$ . Magnetické pole volných nábojů je zřídlové.“

### 2.3.4 Čtvrtá MR (Zákon kontinuity magnetického indukčního toku)

- **Integrální tvar**  $\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \mathbf{0}$

„Magnetický indukční tok libovolnou uzavřenou orientovanou plochou  $S$  je roven nule. (tzn.: tok, který do uzavřené plochy  $S$  vstupuje je roven toku, který z ní vystupuje). Mag. indukční čáry jsou uzavřené, protože existuje volný mag. náboj.“

- **Diferenciální tvar**  $\mathbf{div} \mathbf{B} = \mathbf{0}$

„Divergence vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  roven nule. Magnetické pole je nezřídlové.“

### 2.3.5 Vektorový magnetický potenciál

Vektorový potenciál  $A$  je pomocná matematická veličina k popisu elektromagnetického pole, vycházející z diferenciálního tvaru čtvrté MR.

$$\mathbf{div} \mathbf{B} = 0 \qquad \mathbf{div} \mathbf{B} = \mathbf{div} \mathbf{rot} \mathbf{A} \qquad \mathbf{B} = \mathbf{rot} \mathbf{A}$$

Zavádí se dodatečná podmínka (kalibrace potenciálu)  $\mathbf{div} \mathbf{A} = 0$

## 2.4 Vířivé proudy

Pokud se vodivé těleso pohybuje ve stacionárním magnetickém poli nebo se nepohybuje, ale je v nestacionárním magnetickém poli  $\mathbf{B}(t)$ , indukuje se do něj napětí vlivem magnetického toku, který způsobí průtok proudu (elektromagnetická indukce). Z Lenzova zákona plyne, že indukovaný proud tvoří proudové smyčky (vířivé proudy), jejichž magnetický tok má opačný směr, než tok, který je vyvolal [16].

Vířivé proudy se projevují:

- **Tepelnými účinky**

Průchodem vířivých proudů neideálním vodičem vznikají ztráty ve formě Jouleova tepla, které ohřívají těleso.

- **Silovými účinky**

Vířivé proudy v tělese vyvolávají své magnetické pole, které je v interakci s magnetickým polem, které tyto proudy indukovalo a na těleso působí síla.

Vířivé proudy v některých případech zhoršují funkci a tím i účinnost různých strojů a přístrojů, proto projektanti navrhují různá stínění a geometrii dané součásti, aby vířivé proudy měly delší dráhu s větším odporem, používají málo elektricky vodivé materiály (nejlépe nemagnetické) s nízkou  $\mu_r$ , pro omezení jejich velikosti. Mnoho elektrotechnických zařízení využívá přítomnosti vířivých proudů [15].

#### Využití vířivých proudů

- Indukční tavící pec
- Indukční ohřev
- Elektromagnetická brzda
- Magnetická levitace
- Tlumení systémů měřidel
- Detektory kovu

#### Aplikace nevyužívající vířivých proudů

- Střídavé magnetické obvody
- Transformátory
- Kryty čel vinutí točivých strojů
- Kovové pláště kabelů

Celkové ztráty feromagnetických materiálů  $P$  jsou dány ztrátami hysterezními  $P_h$  způsobenými cyklickým přemagnetováním feromagnetik, vířivými proudy  $P_v$  a ztrátami přidavnými  $P_p$ , které jsou dány rozdílem celkových ztrát a součtem ztrát hysterezních a vířivými proudy.

$$P = P_h + P_v + P_p$$

Hysterezní jsou závislé na frekvenci a vířivé proudy jsou úměrné kvadrátu frekvence.

## 2.5 Jevy ovlivňující rozložení proudové hustoty

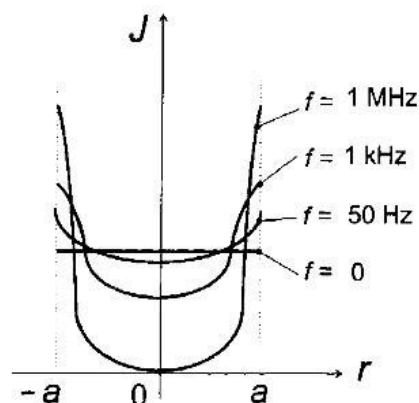
Proudovodič protékaný stejnosměrným proudem má proudovou hustotu v průřezu vodiče rozloženou rovnoměrně. V případě vodiče protékaného střídavým proudem je skutečnost ovlivněna skinefekt, pokud jde o soustavu proudovodičů (sendvičové přípojnice), které se navzájem ovlivňují, také jevem blízkosti (proximity effect). V jejich důsledku dochází k deformaci rozložení proudové hustoty vlivem elektromagnetické interakce.

### 2.5.1 Proximity efekt

Jev kdy vodiče protékané proudem (stejným i opačným směrem) jsou v takové blízkosti, že jejich magnetické pole se navzájem ovlivňují.

### 2.5.2 Skinefekt

Časově proměnný proud  $i(t)$  ve vodiči o poloměru  $a$  vyvolá magnetickou indukci, která v něm indukuje vířivé proudy. Díky jejich orientaci, jsou na povrchu vodiče ve stejném směru jako proudová hustota a v ose vodiče proti sobě. Dochází k vytlačování proudové hustoty ze středu, kde amplituda dosahuje nejmenší své hodnoty k povrchu vodiče, kde je amplituda největší.



Obr. č. 18 Znázornění rozložení proudové hustoty pro různé frekvence [10]

Charakteristickou veličinou pro určení hodnoty povrchového jevu je hloubka vniku  $\delta$  a je to vzdálenost od povrchu směrem k ose vodiče, v níž proudová hustota poklesne na 36,8% hodnoty na povrchu.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Nerovnoměrné rozložení proudové hustoty  $J(a)$  je tím větší, čím větší je kmitočet  $f$ , konduktivita  $\sigma$ , relativní permeabilita  $\mu_r$ . Tyto parametry jsou ovlivněny procházejícím proudem, buď už jeho kmitočtem, nebo jeho velikostí, která způsobuje zvyšování jeho teploty a následný pokles elektrické vodivosti. Při značně vysokých frekvencích proud prochází vrstvou o tloušťce  $\delta$ , vnitřkem vodiče neprochází téměř nic.

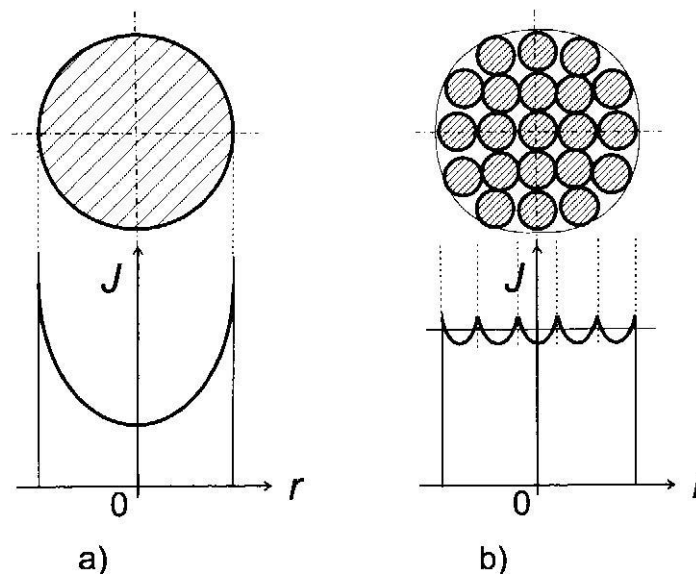
Hloubka vniku $\delta$ [mm]							
$f$	$\gamma_{Cu}=5,7.107$ [S/m]	$\gamma_{Al}=3,7.107$ [S/m]	$\gamma_{Fe}=1,4.107$ [S/m]				
	$\mu_r=1$	$\mu_r=1$	$\mu_r=50$	$\mu_r=100$	$\mu_r=500$	$\mu_r=1000$	$\mu_r=5000$
50	9,43	11,7	2,69	1,9	0,85	0,6	0,27
100	6,67	8,27	1,9	1,35	0,6	0,43	0,19
500	2,98	3,7	0,85	0,6	0,27	0,19	0,09
$10^3$	2,11	2,62	0,6	0,43	0,19	0,13	0,06
$10^4$	0,67	0,83	0,19	0,13	0,06	0,043	0,019
$10^5$	0,21	0,26	0,06	0,043	0,019	0,013	0,006
$10^6$	0,07	0,08	0,02	0,013	0,006	0,004	0,002

Tab. č. 3 Přehled hodnot hloubky vniku pro různé kmitočty a materiály [10]

Skinefekt způsobuje zvýšení odporu a snížení vnitřní indukčnosti vodiče. Odpor vodiče je efektivní  $R_{ef}$  ( $R_{AC}$ ) a stejnosměrný  $R_0$  ( $R_{DC}$ ) dle charakteru proudu. Analogicky pro indukčnost. Koeficient poměrného efektivního odporu  $k_{AC}$  (koeficient střídavého odporu) určuje, kolikrát jsou Jouleovy ztráty vlivem povrchového jevu větší než ztráty při stejnosměrném proudu (násobek rezistivity materiálu).

$$k_{AC} = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{\Delta U_{AC}}{\Delta U_{DC}} = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} = \frac{P_{AC}}{R_{DC} \cdot I^2}$$

U přenosu elektrické energie je skinefekt také nevídaný, proto i energetici musí potlačit vířivé proudy. Proudovodič se nerealizuje z masivního, ale z jednotlivých navzájem izolovaných vodičů, kde rozložení proudové hustoty je úměrné rovnoměrnému rozložení. Použitím trubek získáme stejný efekt [10].



Obr. č. 19 Způsob potlačení skin efektu (více vodičů navzájem izolovaných) [10]

### 3 Comsol Multiphysics

Nástroj pro simulace fyzikálních jevů, dříve nazývaný FEMLAB, který je určen výzkumným i vědeckým pracovníkům, vývojářům a díky rozsáhlé nabízeným funkcím pro zobrazování výsledků specializovaným středním školám a vysokým školám. Software řeší různé fyzikální případy charakterizované parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) za pomoci metody konečných prvků (FEM). Comsol je určen k modelování a k simulaci úloh z oblasti strojírenství, elektrotechniky, chemie a z různorodých sfér fyzik, jako je akustika, vibrace, pružnost a pevnost, prostup tepla, konvekce a difuze, geofyzika, biologie, elektromagnetismus, elektrostatika, polovodiče, dynamika tekutin nebo kvantová mechanika. Do simulací je možno přidat několik fyzik současně (multifyzikální úlohy) a tak realizovat složitější rozbor modelu. Tímto způsobem je možno dospět k výrazně vyšší věrohodnosti modelovaného celku.

Comsol Multiphysics usnadňuje pochopení spousty fyzikálních a technických procesů. Nastavení modelu je velmi rychlé, díky velkému počtu přednastavených fyzik. COMSOL dovoluje vymežit geometrii, materiálové vlastnosti a okrajové podmínky za pomoci závisle proměnných a funkcí (mohou být proměnné v prostoru nebo čase). K programu lze volitelně připojovat specializované nadstavbové moduly z různých fyzikálních oblastí a profesních oborů.

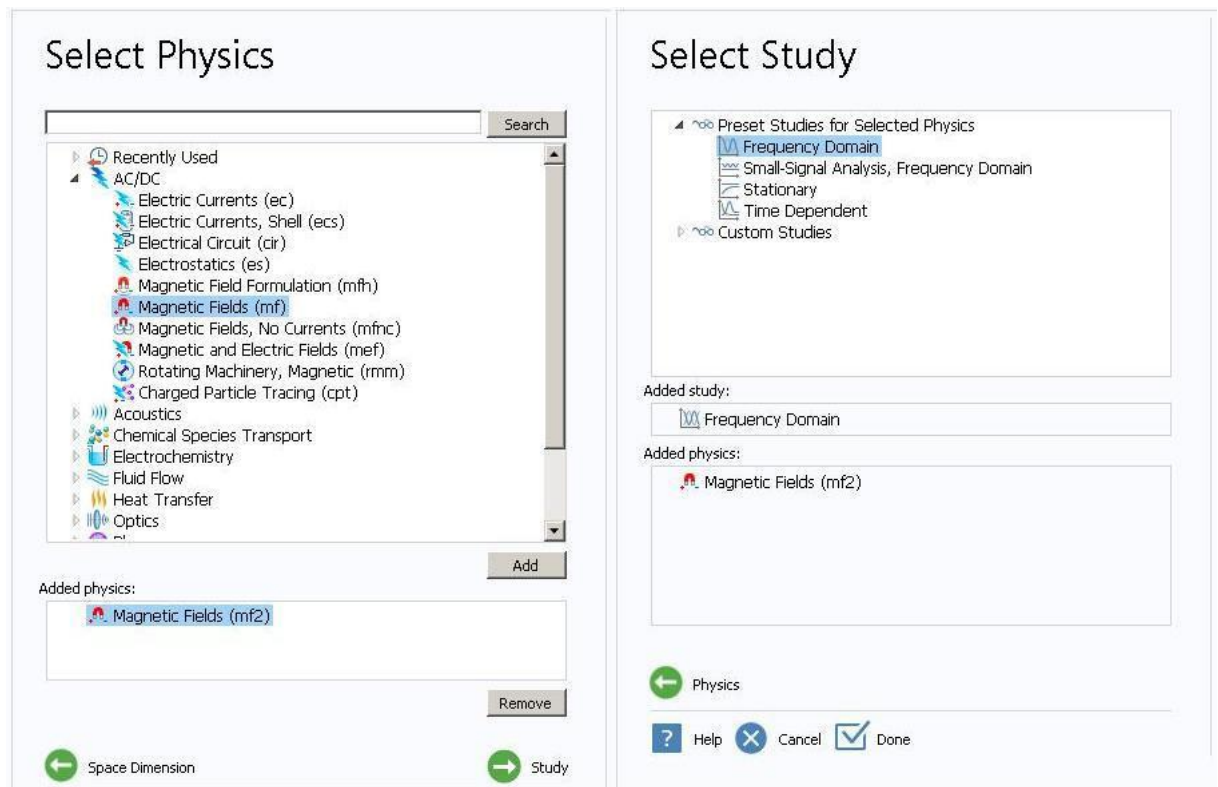
Postup při modelování v Comsol je možno popsat několika základními kroky, které jsou hlavními uzly modelovacího stromu, který je doplňován při realizaci úlohy uživatelem.

- Geometrii řešeného modelu jde udělat v grafickém editoru CAD nástroji. Geometrické modely také mohou být vytvořené v externích CAD systémech.
- Definování okrajových podmínek a vlastností oblastí v modelu je nutnou okolností řešené úlohy. Součástí geometrie mohou být přiřazeny proměnné, funkce i výrazy (oblasti, plochy (ve 3D), hrany, body). K volbě materiálů jednotlivých subdomén slouží knihovna materiálů i chemických prvků (je možná i vlastní definice). Do materiálové knihovny může uživatel vkládat další materiály nebo si vytvořit knihovnu vlastní.
- Generování výpočetní sítě je dalším krokem, kde v uzlových bodech jsou počítána potřebná data. Síť lze nastavit uživatelem, který má možnost volby různých parametrů ve zvolených částech modelu, nebo může být generována automaticky. V modelu lze kombinovat různé typy elementů s odlišnou velikostí.
- Pro výpočet modelu program zahrnuje několik typů řešičů pro výpočet nelineárních i lineárních úloh v časové a frekvenční oblasti. Řešení můžeme pustit z grafického rozhraní nebo v případě propojení s Matlabem z jeho příkazové řádky. COMSOL Multiphysics podporuje běh na vícejádrových počítačích i na počítačových clusterech.
- Závěrečné zpracování dat může být provedeno hodně způsoby. Multifyzikální úlohy zahrnují mnoho vypočtených proměnných, které lze ve vybraných jednotkách vyobrazovat za pomoci barevných map, izoploch, izočar, šipek, proudnic, řezů nebo částic. Úlohy řešené v čase lze animovat s eventuálním zápisem do různých formátů. Kterékoliv řešení je možno pro následující zpracování exportovat do textových souborů. Nepochybností je export vytvořených obrázků a grafů [12][13].



### 3.1 Postup při realizaci modelů

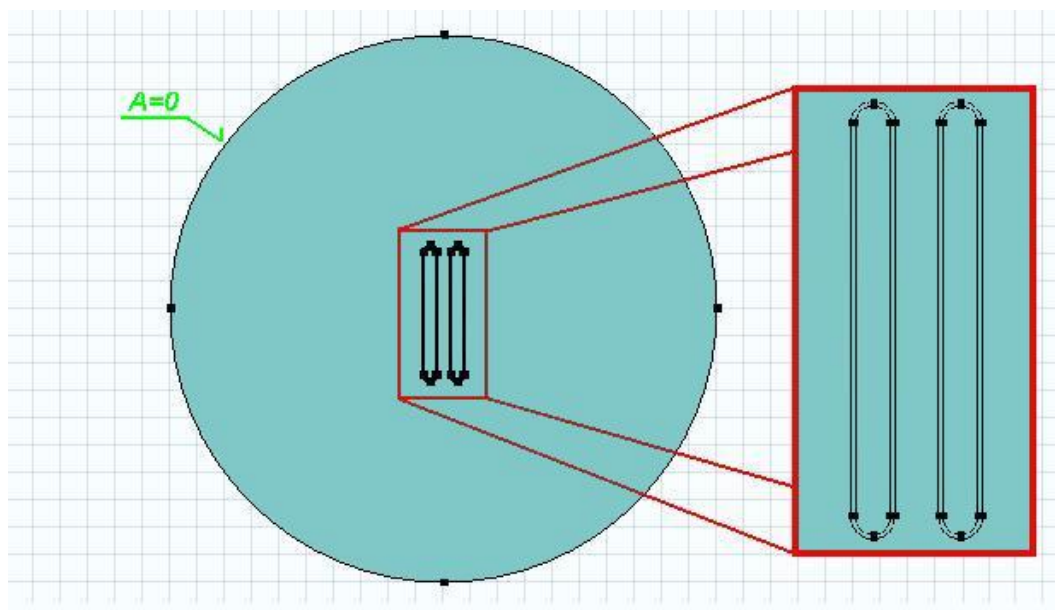
Po spuštění Comsolu 4.4 vybereme možnost průvodce modelem (*Model Wizard*), pro simulaci postačí dvourozměrné pole (2D), jelikož po délce přípojnice se parametry nemění. Zde si z aplikačních módů zvolíme danou fyziku, u mého problému volím z AC/DC modulu fyziku magnetického pole. V posledním kroku nastavení fyzikálního prostředí zvolíme jednu z přednastavených studií. V tomto případě budu řešit frekvenční závislost Jouleových ztrát, proto volím studii frekvenční oblasti (*Frequency Domain*). Dokončím průvodce (ikona *Done*).



Obr. č. 20 Volba fyziky a studie

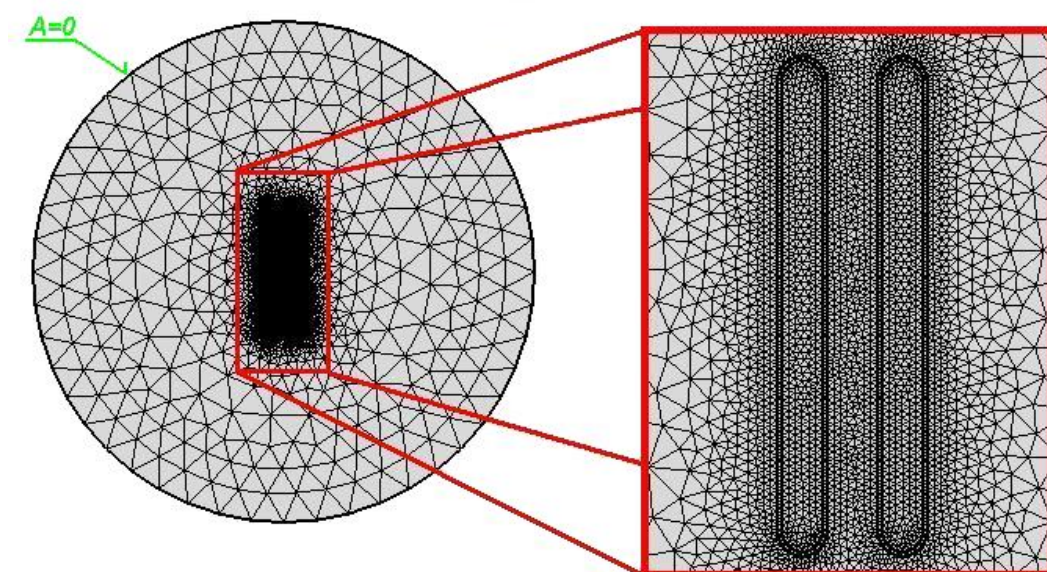
Po nastavení fyzikálního prostředí je na řadě vytvoření samotného modelu. V okně *Model Builder* v záložce *Geometry* nastavíme délkové a úhlové jednotky na milimetry a stupně, utvoříme model, dle daného typu přípojnice. Model lze libovolně upravit a umístit do rastru. Přidáním materiálů v záložce *Materials* jednotlivým subdoménám modelu, dodefinujeme konstrukci přípojnic i okolního prostředí. V záložce (*Magnetic Field*) nastavíme počáteční a okrajové podmínky. Některé počáteční podmínky jsou už přednastaveny (vodivost, permeabilita, permitivita atd.). Zvolil jsem proud 1000 A, teplota okolí je 20 °C a magnetický potenciál rovný nule ( $\mathbf{A}=0$ ) ve vzdálenosti 250mm od středu souřadného systému, aby bylo zamezeno ovlivnění přesnosti výpočtu.

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{0}$$



Obr. č. 21 Model dvou přípojnic 2\*100\*10 mm s 1mm Cu

Před samotným výpočtem je potřeba vygenerovat síť a nastavit její jemnost a další parametry. Síť vygenerujeme tlačítkem *Build All*. Detail sítě je vytvořen s důrazem na měděné pokrytí a bezprostřední okolí přípojnic. Je dostatečně jemná, aby simulace dosáhla určité přesnosti.



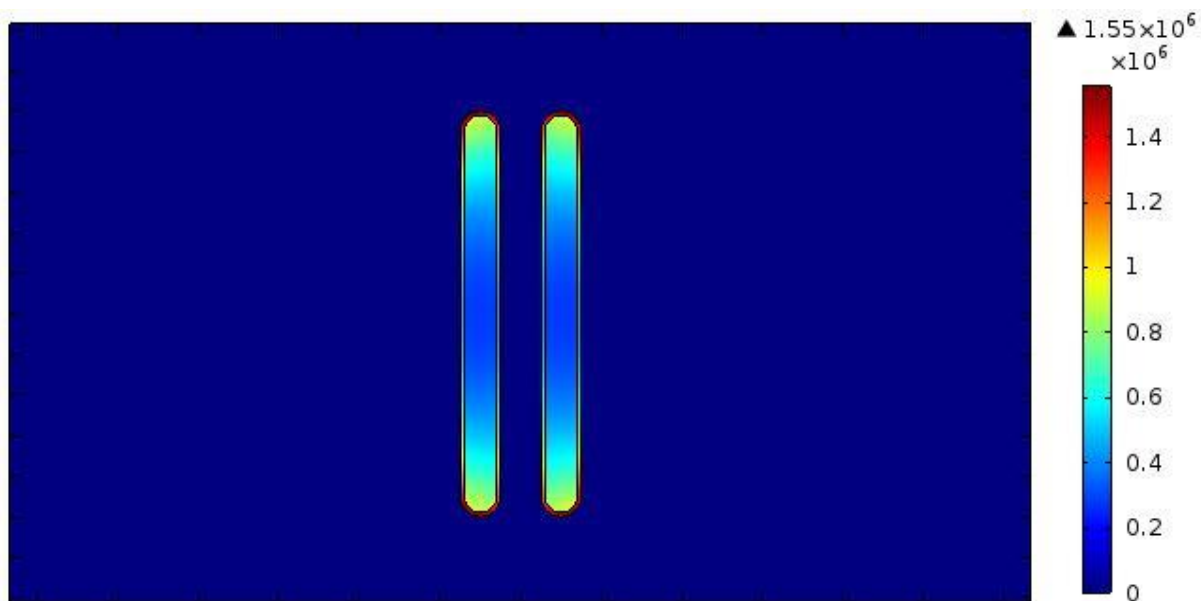
Obr. č. 22 Síť řešené úlohy (vlevo) a detailní výřez v místě přípojnice (vpravo)

V záložce *Study* v položce *Frequency Domain* nastavíme frekvenční oblast pro 0 Hz a 50 Hz, abychom následně mohli srovnat koeficient střídavého odporu  $k_{AC}$ , který je poměrem ztrát střídavých a stejnosměrných. Pro výpočet volíme *Compute* v záložce *Study*. Samotný výpočet vychází z parciální diferenciální rovnice.

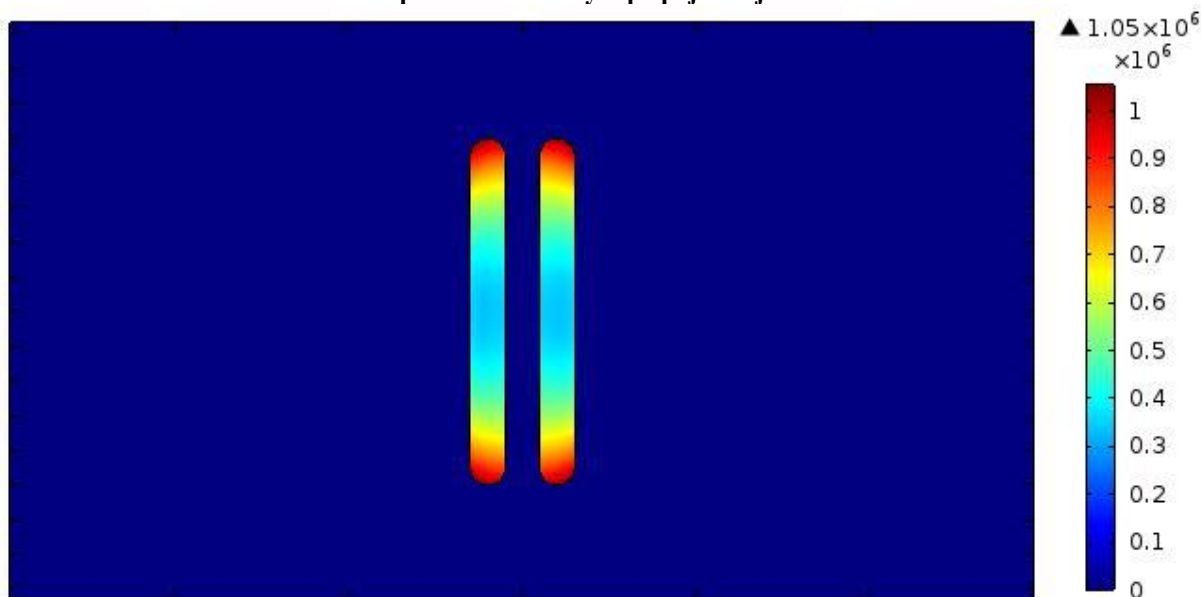
$$(\mathbf{j}\omega\boldsymbol{\sigma} - \omega^2 \boldsymbol{\varepsilon}_0 \boldsymbol{\varepsilon}_r) \mathbf{A} + \nabla \times (\boldsymbol{\mu}_0^{-1} \boldsymbol{\mu}_r^{-1} \mathbf{B}) - \boldsymbol{\sigma} \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_e$$

Po výpočtu modelu výsledky najdeme v záložce *Result*. V položce *Derived Values* přidáme *Surface Integration*, kde musíme nastavit rezistivní ztráty a přes jaké subdomény chceme integrovat. Pro výpis hodnot do tabulky zvolím *Evaluate*. V tabulce jsou poté ztráty pro 0 Hz a 50 Hz (protože jsem tuto možnost nastavil v položce *Frequency Domain*). Data z tabulky je možno exportovat do textového dokumentu a poté s nimi dále pracovat.

Pro zobrazení výsledku simulace (rozložení proudové hustoty) je nutno v položce *Magnetic Flux Density* vytvořit *Surface* a zde nastavit *Current Density*, poté zobrazíme pomocí tlačítka *Plot*. Výstupem jsou grafy rozložení proudové hustoty dvojité přípojnice.



Obr. č. 23 Rozložení proudové hustoty u přípojnic s jedním milimetrem mědi



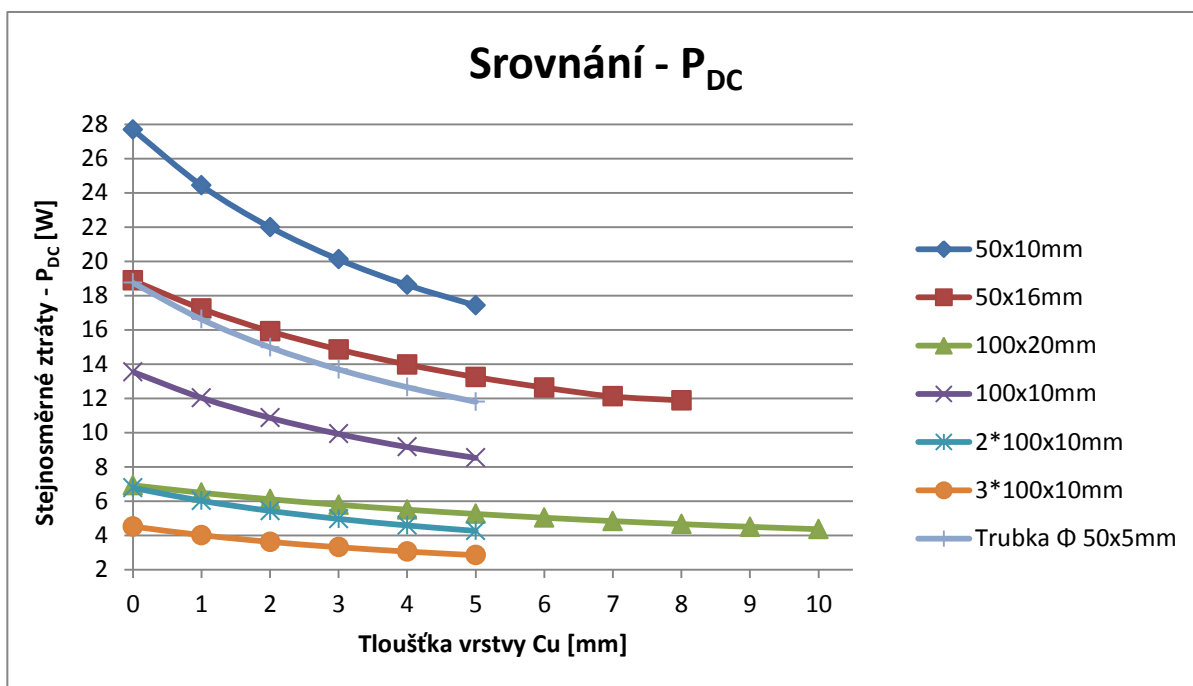
Obr. č. 24 Rozložení proudové hustoty přípojnice z čistého hliníku

Na obrázcích je velmi zřetelně vidět vytlačení elektrického proudu k povrchu vodiče vlivem skin efektu a navíc se zde uplatňuje jev blízkosti, který má za následek ještě větší nevyužití materiálu.

### 3.2 Zhodnocení výsledků

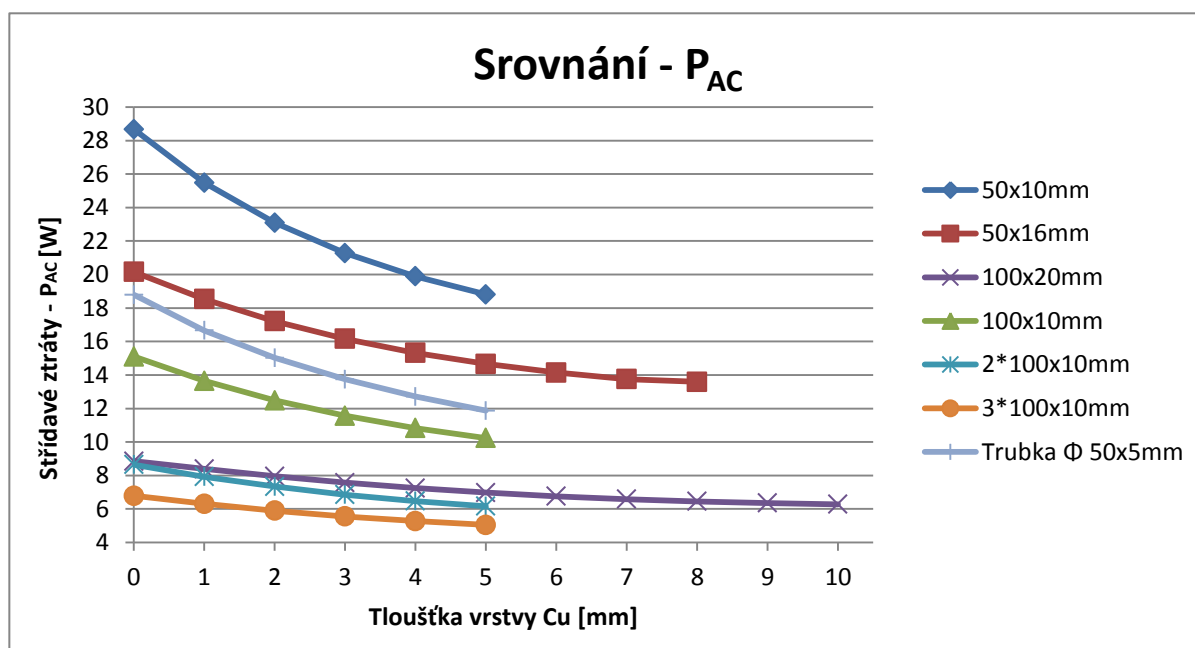
Výstupem ze simulací jsou data, která byla zpracována, a vytvořeny grafy. V grafech můžeme vidět ztráty (na jeden metr délky přípojnice) při průchodu proudem 1000 A o různé frekvenci, kde je na hliníkový vodič (při konstantním průřezu) přidávána vrstva mědi po milimetrech až do stavu, kdy je materiál celý měděný. Různé rozměry přípojníc byly voleny tak, aby se daly dobře zhodnotit Jouleovy ztráty na jeden metr délky s měnícím se průřezem materiálů.

První graf znázorňuje ztráty přípojníc o rozdílných rozměrech s různě tlustou vrstvou mědi při průchodu stejnosměrným proudem.



Graf č. 1 Ztráty vyvolané ss proudem

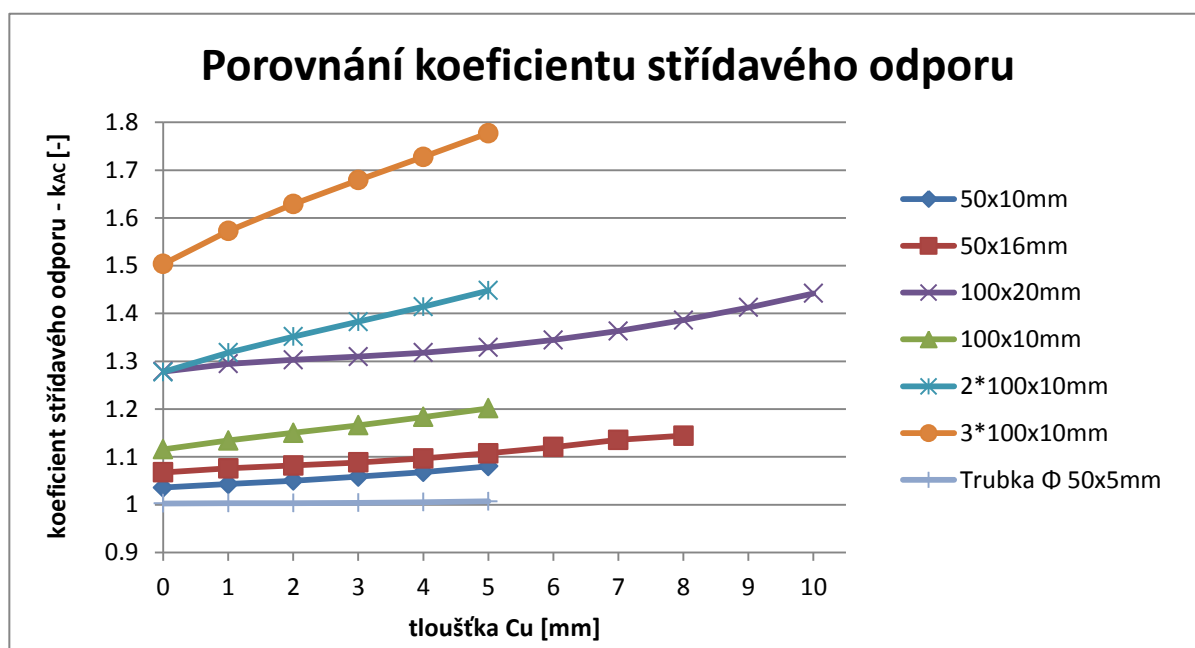
Druhý graf se liší procházejícím proudem, který je střídavý s frekvencí 50 Hz.



Graf č. 2 Ztráty vyvolané st proudem

Z grafů můžeme vyčíst, že přípojnice procházející *ss* i *st* proudem vykazují nižší ztráty při zvětšující se vrstvě mědi, snižují se stále méně výrazněji. Když zvětším průřez přípojnice dvakrát (ať už změnou rozměrů, nebo zdvojením přípojnic), ztráty také klesnou přibližně na polovinu. Nižší ztráty znamenají i nižší tepelné namáhání.

Koeficient střídavého odporu  $k_{AC}$  znázorňuje zvýšení Jouleových ztrát vlivem skin efektu, oproti průchodu stejnosměrného proudu. S tloušťkou mědi se koeficient zhoršuje.



Graf č. 3 Integrace Jouleových ztrát a jejich srovnání s průchodem *ss* proudem

## Závěr

Shrnutím aktuálního stavu přípojnic jsem si udělal v problematice náhled na široké spektrum vyráběných typů systémů přípojnic. Na simulace byl použit software pro řešení multifyzikálních aplikací, v kterém jsem se musel naučit orientovat. Poté jsem provedl simulace rozložení proudové hustoty několika profilů přípojnic a utvrdil jsem si informace nabyté v předchozím studiu elektromagnetického pole.

Při použití mědí pokrytých hliníkových přípojnic s tloušťkou mědi 1 mm klesly ztráty při 50 Hz přibližně o 11 % oproti čistě hliníkovým přípojnicím. S tloušťkou mědi 2 mm klesly o 19 %, se 3 mm o 25%, se 4 mm o 30 % a s 5 mm o 34 %. Při sendvičovém uspořádání přípojnic pokles ztrát nebyl tak markantní.

Tyto mědí pokryté hliníkové přípojnice se používají v aplikacích kdy je nežádoucí jejich oteplení vlivem Jouleových ztrát. Například ovládací panelové desky, usměrňovače, vinutí motorů a generátorů, železniční aplikace, bimetalové konektory a další.

Z ekonomického hlediska je nepřijatelné, aby materiál nebyl dostatečně využíván (využití materiálu se dosti sníží vlivem skin efektu), navíc samotné pomědění je nelevný technologický proces, proto je čistý hliník perspektivnější než poměděný. Užitím slitin Al a Cu není řešením, protože mají obecně horší vodivost než čisté kovy. Ovšem nejvýhodnějším řešením se jeví trubkové přípojnice, jejichž tloušťka stěny odpovídá hloubce vniku.

Taky si myslím, že použití dvou materiálů o různé teplotní délkové roztažnosti by při zahřívání v případě přetížení mohlo vést k mechanickému poškození přípojnic, které může způsobit škody na majetku a negativně ovlivnit zdraví osob.

Daná problematika si zaslouží podrobnější analýzu z pohledu tepelného pole, která by mohla být námětem na diplomovou práci.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 174 s. ISBN 80-708-2940-0.
- [2] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [3] HAMERNÍK, Jaroslav. *Koroze a ochrana před korozi* [online]. [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: [jhamernik.sweb.cz/Koroze.htm](http://jhamernik.sweb.cz/Koroze.htm)
- [4] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008, 168 s. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [5] PLACHÁ, Michaela. *Silové a tepelné účinky ve strukturách s masivními vodiči*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] KULAČ, Ivan. *Projekt logické ochrany přípojnic*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] IN-EL: *Hliníkové vodiče a jejich používání* [online]. [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: [www.in-el.cz/?t=201](http://www.in-el.cz/?t=201)
- [8] BRUKER: *The Engineered Alternative to Copper Busbar* [online]. [cit. 2014-11-26]. Dostupné z: [www.bruker.com/fileadmin/user\\_upload/8-PDF-Docs/BEST/DataSheets/Busbar.pdf](http://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/BEST/DataSheets/Busbar.pdf)
- [9] SIEMENS: *Přípojnicové systémy SIVACON 8PS* [online]. [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: [www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=210cd8c0e6&ctxp=home](http://www1.siemens.cz/ad/current/index.php?vw=0&ctxnh=210cd8c0e6&ctxp=home)
- [10] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. České Budějovice: KOPP nakladatelství, 2012. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [11] EATON: *Hliníkové a měděné přípojnicové systémy Mempower* [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: [www.eatonelektrotechnika.cz/pdf/tiskoviny\\_pdf\\_383.pdf](http://www.eatonelektrotechnika.cz/pdf/tiskoviny_pdf_383.pdf)
- [12] HUMUSOFT: *COMSOL Multiphysics* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol](http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol)
- [13] HUMUSOFT: *Svaz-csoz* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [www.svaz-csoz.eu/news/humusoft-s-r-o](http://www.svaz-csoz.eu/news/humusoft-s-r-o)
- [14] KUPILÍK, Martin. *Dynamický ohřev kabelových vodičů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [15] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd., přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001, 357 s. ISBN 80-708-2826-9.
- [16] PEKAŘ, Michal, Miloslav SCHILLER a Jaroslav SEJKORA. *Vířivé (Foucaultovy) proudy* [online]. [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2006-2007/Leto07/proc/virivepr.pdf>

