

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv uspořádání vinutí na ztráty při vysokých frekvencích

Autor práce: **Bc. Martin Bělík**  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Laksar, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin BĚLÍK**  
Osobní číslo: **E22N0033P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektrické stroje**  
Téma práce: **Vliv uspořádání vinutí na ztráty při vysokých frekvencích**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

## Zásady pro vypracování

1. Proveďte literární rešerši metod analýz ztrát ve vinutích elektrických strojů při zvýšené frekvenci.
2. Navrhněte vhodná uspořádání (krok vinutí, průměr vodiče, počet závitů, počet paralelních drátů) pro měření se zvýšenou frekvencí.
3. Vybraná uspořádání vypočtete pomocí metody konečných prvků různými metodami (samostatně vodiče, "Litz Wire Composition").
4. Zvolená uspořádání naviňte a proveďte měření.
5. Diskutujte obdržené výsledky.



Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Vědecké publikace věnující se dané problematice (<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>).
2. Ansys Electronics Desktop help (<https://www.ansys.com/products/electronics>).

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Laksar, Ph.D.**  
Research and Innovation Centre for Electrical  
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Práce se zabývá zkoumáním vlivu konstrukce vinutí na velikost ztrát generovaných vinutím elektrických strojů. V práci jsou popsány 2D modely zkoumající možnosti redukce ztrát pomocí odsunutí vinutí od otevření statorové drážky, změnou materiálu vinutí, změnou počtu paralelních větví, použitím Litz wire, tvarem závitů a vlivem pozice závitů na velikosti ztrát. K jednotlivým modelům je uvedena diskuse obdržných výsledků. Dále se práce zabývá měřením vzorků vinutí, metodou stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice statorového paketu z neznámého materiálu. V závěru se věnuje diskusi výsledů měření a modelů. Modely byly vytvořeny v programu Ansys.

## **Klíčová slova**

Ansys, Maxwell 2D, MKP, ztráty ve vinutí, ztráty od vířivých proudů, redukce ztrát, konstrukce vinutí, ztráty v železe

## **Abstract**

The thesis investigates the influence of the winding design on the winding losses of electrical machines. This work describes 2D models that study the possibilities of loss reduction by the winding displacement from the stator slot opening, by the change of the winding material, by the change of number of parallel wires, by the application of Litz wire, by the turn design and the influence of the turns position on the winding losses. A discussion of obtained results is included for each model. Further, this work includes winding samples measurement, the Steinmetz coefficient estimation method for stator made of unknown material and at last a discussion of the measurement results and models. Models were created using Ansys software.

## **Key Words**

Ansys, Maxwell 2D, FEM, winding losses, eddy current losses, loss reduction, winding design, core losses

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Laksarovi, Ph.D. za odborné rady a pomoc poskytnutou při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Zdeňkovi Frankovi za poskytnutý statorový paket, panu doc. Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za udělený přístup k výpočetnímu serveru Condor. Nakonec bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Dvořákovi, Ph.D. a Ing. Lukášovi Bouzkovi, Ph.D. za poskytnuté rady.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Rešerše.....	- 3 -
1.1 Ztráty ve strojích.....	- 3 -
1.2 Metoda konečných prvků .....	- 5 -
1.2.1 2D modely .....	- 5 -
1.2.2 3D modely .....	- 7 -
1.2.3 Hybridní 2D a 3D modely .....	- 8 -
1.3 Možnosti omezení ztrát ve vinutí .....	- 8 -
2 Modelování.....	- 16 -
2.1 Volba vzorku a návrh vinutí .....	- 16 -
2.2 Šablona modelu .....	- 20 -
2.3 Vliv zjednodušení modelu na velikost ztrát .....	- 22 -
2.3.1 Simulace třífázového napájení s vloženým rotorem.....	- 23 -
2.3.2 Výsledky srovnání .....	- 24 -
2.4 Srovnání jednovrstvého a dvouvrstvého vinutí .....	- 27 -
2.5 Ztráty jednotlivých závitů.....	- 27 -
2.6 Odsunutí vinutí od otevření drážky .....	- 29 -
2.7 Změna materiálu vinutí.....	- 35 -
2.8 Změna počtu paralelních vodičů.....	- 40 -
2.9 Litz wire konfigurace.....	- 47 -
2.10 Vliv tvaru závitu .....	- 53 -
3 Měření cívek a validace ztrátových koeficientů modelu .....	- 57 -
3.1 Měřené vzorky .....	- 57 -
3.2 Měření .....	- 59 -
3.3 Stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice .....	- 60 -
3.4 Model tlumivky .....	- 66 -
3.5 Výsledky měření a modelu cívky navinuté z vodiče o průměru 1,25 mm .	- 67 -
3.6 Výsledky měření a modelu cívky navinuté z vodiče o průměru 0,71 mm .	- 69 -
3.7 Srovnání upravených modelů cívek a dat z měření.....	- 71 -
Zhodnocení a závěr .....	- 75 -

Literatura.....	- 78 -
Přílohy.....	I
Příloha 1. – Vliv zjednodušení modelu na velikost ztrát .....	I
Příloha 2. – Ztráty jednovrstvého a dvouvrstvého vinutí.....	IV
Příloha 3. – Ztráty vinutí s provedeným odsunutím .....	VI
Příloha 4. – Ztráty vinutí z rozdílných materiálů.....	X
Příloha 5. – Ztráty vinutí s rozdílným počtem paralelních vodičů .....	XII
Příloha 6. – Nastavení Litz Wire simulací.....	XIV
Příloha 7. –Litz Wire konfigurace .....	XVI
Příloha 8. –Vliv tvaru závitu na velikosti ztrát .....	XVIII
Příloha 9. –Výsledky měření .....	XX
Příloha 10. –Model cívky 0,35 mm .....	XXII
Příloha 11. –Modely navinutých cívek.....	XXIV



## Seznam symbolů a zkratk

$b_c$	mm	šířka vodiče
$b_{pm}$	mm	šířka magnetu
$b_z$	mm	šířka statorového zubu
$B$	T	indukce magnetického pole
$B_{max}$	T	maximální hodnota indukce magnetického pole
$B_{ref}$	T	referenční hodnota indukce magnetického pole
$d$	mm	průměr vodiče
$d_{ekv}$	mm	ekvivalentní průměr vodiče
$d_h$	mm	hloubka vniku
$D_{1e}$	mm	vnější průměr statoru
$D_{1i}$	mm	vnitřní průměr statoru
$D_{2e}$	mm	vnější průměr rotoru
$D_{2i}$	mm	vnitřní průměr rotoru
$f$	Hz	frekvence
$h_c$	mm	výška vodiče
$h_{pm}$	mm	výška magnetu
$H$	A/m	intenzita magnetického pole
$H_c$	kA/m	koercitivní intenzita magnetického pole
$I$	A	elektrický proud
$I_f$	A	fázový proud
$k$		poměrná hodnota ztrátových koeficientů
$k_{AC}$		ztrátový činitel
$k_c$		koeficient ztrát vířivých proudů Steinmetzovy rovnice
$k_e$		koeficient přídavných ztrát Steinmetzovy rovnice
$k_h$		koeficient hysterenzních ztrát Steinmetzovy rovnice
$k_i$		koeficient stanovený iterací
$k_p$		koeficient získaný pomocí metody nejmenších čtverců
$k_1$		ztrátový koeficient stanovený proložením
$k_2$		ztrátový koeficient stanovený proložením
$K_S$		korekční činitel
$K_t$		činitel plnění drážky
$K_{tl}$		činitel plnění drážky jedné vrstvy vinutí

$l$		index značící příslušnou vrstvu vinutí
$l_a$	m	aktivní délka vinutí
$l_{Fe}$	mm	délka statorového paketu
$l_v$	m	délka vinutí
$L_s$	H	indukčnost sériové LR kombinace
$n_p$		počet paralelních vodičů
$N$		počet závitů
$N_l$		počet závitů ve vrstvě 1
$N_s$		počet závitů v sérii
$Q$		počet drážek statoru
$p$		počet pólových dvojic
$R_{AC}$	$\Omega$	odpor vinutí při střídavém napájení
$R_{DC}$	$\Omega$	odpor při stejnosměrném napájení
$R_s$	$\Omega$	odpor sériové LR kombinace
$S$	$\text{mm}^2$	plocha 1/6 statorového paketu
$S_c$	$\text{mm}^2$	plocha cívky
$S_d$	$\text{mm}^2$	plocha statorové drážky
$S_v$	$\text{mm}^2$	průřez vodiče
$T$	s	perioda signálu
$V$	$\text{m}^3$	objem tělesa
$w_l$	mm	šířka vrstvy vinutí
$w_m$	$\text{J}/\text{m}^2$	hustota energie magnetického pole
$W_m$	J	celková energie magnetického pole
$\alpha$		exponent Steinmetzovy rovnice
$\gamma$	S/m	vodivost
$\delta$	mm	výška vzduchové mezery
$\delta_s$	mm	hloubka vniku
$\Delta$	%	chyba proložení metodou konečných čtverců
$\Delta$	%	chyba ztrát stanovených modelem
$\Delta P$	W	celkové ztráty stanovené modelem
$\Delta P_{AC}$	W	ztráty vzniklé průchodem střídavého proudu
$\Delta P_c$	W	ztráty vířivých proudů
$\Delta P_{DC}$	W	ztráty vzniklé průchodem stejnosměrného proudu
$\Delta P_e$	W	ztráty přídavné

$\Delta P_{ed}$	W	ztráty způsobené vířivými proudy
$\Delta P_{FE}$	W	ztráty v železe
$\Delta P_h$	W	ztráty hysterezní
$\Delta P_W$	W	ztráty ve vinutí
$\Delta t$	s	krok simulace
$\varepsilon$	°	fázový posuv
$\mu$		permeabilita
$\mu_r$		relativní permeabilita
$\mu_0$		permeabilita vakua
$\rho$	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	měrný odpor
$\rho_{mag}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	hustota magnetu
$\omega$	rad/s	úhlová rychlost
$\omega_r$	ot/min	otáčivá rychlost rotoru

## Úvod

Jednou z částí návrhu elektrického stroje je výpočet ztrát. Vypočtené hodnoty jsou následně použity pro teplotní výpočty a návrh chlazení. Problém představuje samotné stanovení ztrát ve stroji. Používané postupy sice postačují pro prvotní návrh stroje a chlazení, ale nejsou příliš přesné. Při procesu návrhu stroje se proto musí používat numerické metody, které danou problematiku simulují lépe.

Současná úroveň matematického popisu vzniku ztrát ve vinutí a jejich rozložení se opírá o výpočet Jouleových ztrát, který je přesný při výpočtu ztrát stejnosměrného napájení. Při použití střídavého napájení o vysoké frekvenci dochází ve vinutí k nelineárnímu rozložení proudu a vzorec  $R \cdot I^2$  přestává platit.

Pro pracovní harmonickou blížící se 1 kHz uvedený vzorec poskytuje diametrálně odlišný výsledek v porovnání s realitou. Zároveň se ve vinutí vyskytují spínací frekvence měničů, které také přispívají ke vzniku ztrát při kmitočtech vyšších, než je pracovní harmonická. V případě trakčních strojů může pracovní harmonická nabývat velikosti 600 až 800 Hz. Uvedený problém se týká i strojů navržených pro elektromobilitu či vysokootáčkových strojů. Vysokootáčkové stroje mohou dosahovat až 300 000 ot/min. Při tak vysokých otáčkách je stroj již napájen frekvencemi v řádech kHz. [13, 14]

Při výpočtu ztrát dochází také ke stanovení ztrát přídatných a ztrát způsobených nesinusovým napájením. Ztráty přídatné jsou vypočteny součinem volené konstanty a jmenovitého výkonu stroje. Stejným způsobem jsou stanoveny i ztráty při nesinusovém napájení, kdy dochází k násobení konstanty s celkovými ztrátami při sinusovém napájení. Konstanty jsou voleny na základě zkušeností tak, aby se návrh blížil výsledkům z měření. [12]

Z uvedených informací je patrná nezbytnost výzkumu týkajícího se popisu ztrát ve vinutí a vývoje přesnějšího postupu pro stanovení ztrát. Analytické metody nejsou bohužel pro popis příliš vhodné. Některé analytické metody problematiku příliš zjednodušují, jiné jsou spíše nepraktické pro použití kvůli příliš složitému popisu. [4] Danou problematiku lze snáze popsat metodou konečných prvků. Problém však představuje nutnost vytvoření detailního modelu vinutí, který je značně hardwarově náročný. Přesto jsou takové modely vhodné alespoň pro pochopení uvedené problematiky a vytvoření základního popisu fyzikální reality odehrávající se ve vinutí. [15, 17]

Detailnější popis vzniku ztrát lze následně využít k potlačení ztrát. Redukce vznikajících ztrát umožní snížení provozních nákladů a navýšení výkonové hustoty. Vyšších hodnot výkonové hustoty je vždy dosaženo zdokonalováním konstrukce elektrických strojů. Z hlediska elektrické trakce či elektromobility jsou tyto snahy nezbytné ke zmenšení montážního prostoru a snížení celkové váhy.

Práce představuje nekonvenční způsob modelování vinutí, který lépe popisuje vznik ztrát a rozložení proudu v závitech vinutí. Dále se práce zabývá možnostmi redukce ztrát, kterých lze docílit konstrukční úpravou vinutí, výrobou vzorků, měřením a stanovením ztrátových koeficientů magnetického obvodu.

# 1 Rešerše

## 1.1 Ztráty ve strojích

Ztráty jsou neodmyslitelnou součástí elektrických strojů. Představují nežádoucí překážku, která ovlivňuje minimální rozměry strojů. Ztráty ve strojích jsou rozdělovány do tří kategorií podle místa jejich vzniku. Obvykle bývají ztráty rozdělovány na ztráty Jouleovy, ztráty v železe a ztráty mechanické. Ztráty v železe byly dlouhodobě zkoumány a omezovány. V současné době jsou tyto ztráty výrazně potlačeny. Z hlediska budoucího technologického vývoje je nepravděpodobný výrazný posun v této oblasti vědeckého výzkumu. Ztráty Jouleovy byly také podrobeny důkladnému a dlouho trvajícím zkoumání. Přesto existují stále postupy umožňující omezení Jouleových ztrát, které nejsou běžně aplikovány při výrobě elektrických strojů.

Jouleovy ztráty vznikají průchodem elektrického proudu skrze vinutí elektrických strojů a mohou být dále členěny podle druhu protékajícího proudu. Ztráty  $\Delta P_{DC}$  vznikající průchodem stejnosměrného proudu v jedné fázi lze stanovit vzorcem

$$\Delta P_{DC} = R_{DC} \cdot I^2 = \frac{\rho \cdot l_v \cdot N_s \cdot I^2}{n_p \cdot S_v}, \quad (1.1)$$

kde  $R_{DC}$  je odpor vinutí,  $I$  protékající proud,  $\rho$  měrný odpor,  $l_v$  délka vinutí,  $N_s$  počet závitů v sérii,  $n_p$  počet paralelních vodičů,  $S_v$  průřez vodiče.

Ztráty vzniklé průchodem střídavého proudu lze stanovit různými způsoby. Je možné použít analytické vzorce, metodu konečných prvků či hybridní přístupy. [2]

Ztráty  $\Delta P_{AC}$  vzniklé průchodem střídavého proudu lze stanovit vzorcem [1]

$$\Delta P_{AC} = \Delta P_{DC} + \Delta P_{ed}, \quad (1.2)$$

kde  $\Delta P_{ed}$  jsou ztráty způsobené vířivými proudy.

Ztráty od vířivých proudů jsou způsobeny skin efektem, proximity efektem, vířivými proudy vybuzenými vnějším polem a cirkulačními proudy. [2]

Skin efekt lze chápat jako nelineární rozložení proudové hustoty ve vodiči způsobené průtokem časově proměnného proudu skrze vodič. Proud vlivem skin efektu protéká pouze v okolí vnějšího povrchu vodiče, zatímco střed vodiče je proudem nevyužitý. Je stanoven parametr nazývaný hloubka vniku, který popisuje hloubku penetrace proudu od povrchu vodiče do bodu směrem ke středu vodiče, ve kterém proudová hustota dosahuje hodnoty 36,8 % proudové hustoty na povrchu vodiče. Hloubka vniku je ovlivněna frekvencí, rezistivitou a permeabilitou použitého materiálu. [2, 3]

Na rozdíl od skin efektu, proximity efekt způsobují časově proměnné proudy protékající sousedními vodiči. Magnetická pole vodičů způsobí vznik vířivých proudů a nelineární rozložení proudové hustoty uvnitř vodičů. Proximity efekt je závislý na směru protékajících proudů. [1, 2]

Vířivé proudy indukované vnějším polem mohou být způsobeny například rozptylovým tokem v blízkosti otevření drážky. [1]

Cirkulační proudy jsou způsobeny magnetickou indukcí. Závity v rozdílných vrstvách jsou zasaženy různě velkými magnetickými toky, které způsobí rozdíl indukovaných napětí mezi závity. Napěťový rozdíl je následně kompenzován cirkulačním proudem. [2]

Ztráty vířivými proudy od vnějšího magnetického pole ve vodiči obdélníkového průřezu lze popsat vzorcem [2, 4]

$$\Delta P_{ed} = \frac{\pi \cdot l_a \cdot \omega^2 \cdot B^2 \cdot b_c \cdot h_c^3}{24 \cdot \rho}, \quad (1.3)$$

kde  $l_a$  je aktivní délka vinutí v drážce,  $\omega$  úhlová rychlost,  $B$  maximální hodnota magnetické indukce vnějšího sinusového pole,  $b_c$  šířka vodiče,  $h_c$  výška vodiče.

Pro vodiče kruhového průřezu je stanoven vzorec [4]

$$\Delta P_{ed} = \frac{\pi \cdot l_a \cdot \omega^2 \cdot B^2 \cdot d^4}{128 \cdot \rho}, \quad (1.4)$$

kde  $d$  je průměr vodiče.

Obě rovnice jsou zjednodušené a platí za dále uvedených předpokladů. Indukovaný proud ve vodiči je omezen odporem. Magnetické pole generované vířivými proudy je zanedbatelné ve srovnání s vnějším magnetickým polem. Oba vzorce zanedbávají vliv vzájemné interakce sousedních vodičů a indukčnost dráhy vířivých proudů. [4] Magnetickou indukci ve vzorci lze považovat za konstantní hodnotu v případě, že jsou rozměry vodičů dostatečně malé. Vzorce 1.3 a 1.4 uvažují dráhu toku vířivých proudů uzavírajících se v celé aktivní délce vinutí. Pro výpočet drah kratších je potřeba použít jiných vzorců. [17]

Magnetickou indukci  $B$  lze stanovit vzorcem [15]

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \sum_{l=1}^N N \cdot I}{w_l}, \quad (1.5)$$

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $w_l$  je šířka vrstvy vodičů,  $N$  počet závitů,  $l$  je index pro označení vrstev vinutí.

Alternativní postup používá pro výpočet ztrát efektivní hodnotu odporu

$$R_{AC} = R_{DC} \cdot k_{AC} \quad (1.6)$$

Ztrátový činitel  $k_{AC}$  pro vodiče kruhového průřezu je stanoven vzorcem [4]

$$k_{AC} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\sum_{l=1}^N N \cdot I}{N_l \cdot I} \right)^2 \cdot \left( \sqrt{K_{tl}} \cdot \frac{h_c}{\delta_s} \right)^4, \quad (1.7)$$

kde  $\delta_s$  je hloubka vniku,  $K_{tl}$  činitel plnění drážky jedné vrstvy vinutí,  $N_l$  počet závitů v jedné vrstvě vinutí.

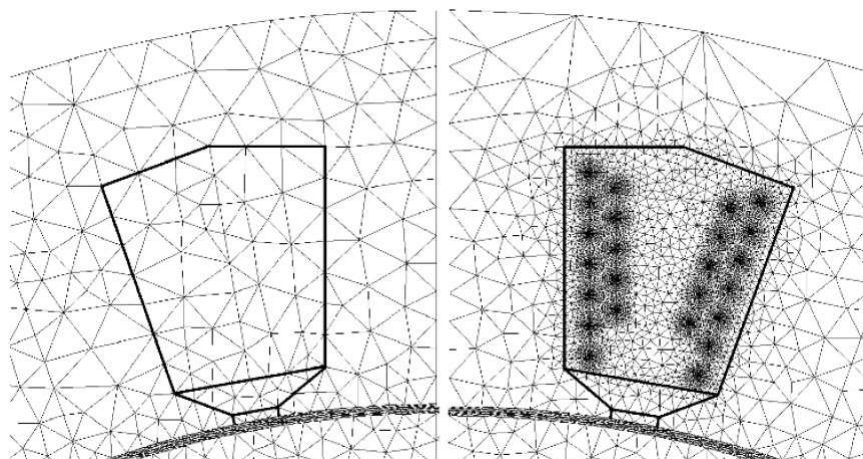
Činitel plnění drážky je ve vzorci 1.7 stanoven rovnicí [4]

$$K_{tl} = \frac{N_l \cdot \left( \frac{\pi \cdot h_c^4}{4} \right)}{b_c \cdot h_c} \quad (1.8)$$

## 1.2 Metoda konečných prvků

### 1.2.1 2D modely

Standardní způsob modelování cívek pomocí ekvivalentní plochy vinutí se stanovenými parametry je pro tento účel nedostačující. Modely analyzující ztráty způsobené tokem vířivých proudů vyžadují modelování jednotlivých závitů, které umožní stanovit proudovou hustotu v závitech. Tento způsob modelování je nezbytný pro výpočet povrchového jevu způsobeného proximity efektem a skin efektem. Vytvořeným modelům vinutí je potřeba přiřadit jemnou síť v oblasti vinutí (viz Obr. 1). Síť by měla být nejjemnější ve vrstvách vinutí blízko otevření drážky, kde je proud nejvíce nelineárně rozložen. Velké množství uzlů sítě vede na vysoké hardwarové nároky a prodlužuje dobu simulace. [15, 17]



Obr. 1: Příklad generované sítě standardního modelu vinutí (vlevo) a modelu pro výpočet ztrát ve vinutí (vpravo) [15]



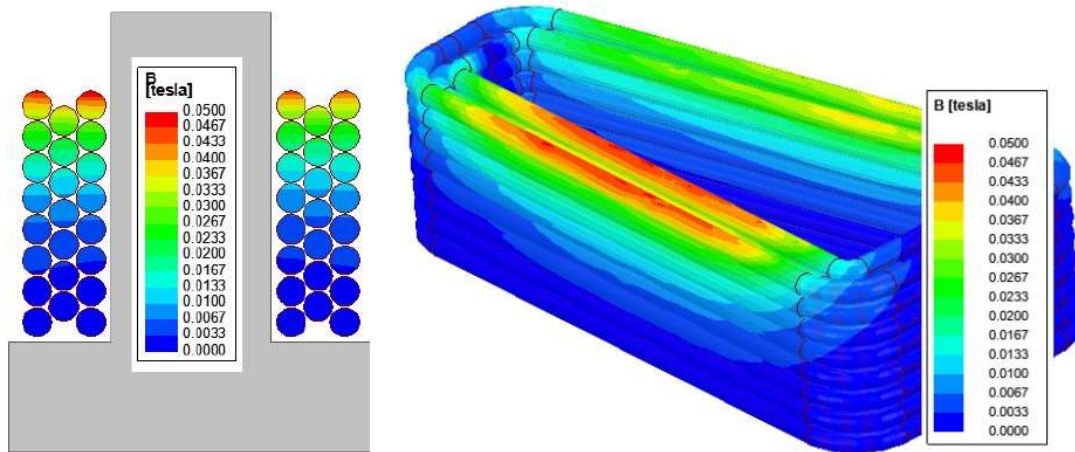
Pro urychlení doby výpočtu je nezbytné výsledné modely zjednodušovat. Zjednodušení spočívají v tvorbě modelů symetrických částí stroje [7]. Zjednodušení mohou být ovlivněna i samotným experimentem, kdy model může být tvořen jen výsečí statoru s vinutím či modelem dvou drážek s jednou cívkou. [2, 8, 9]

Pokud jsou závity tvořeny několika paralelními vodiči je potřeba modelovat zvlášť i paralelní vodiče. Modelované vinutí je následně nutné propojit s externím obvodovým schématem zapojení paralelních vodičů a zdrojem napájení. [5, 8, 9]

2D modely jsou kvůli modelované úrovni detailů více preferované než 3D modely, které by byly neúměrně náročnější na přípravu a výpočet. Detailní modely vinutí není jednoduché parametrizovat či na nich aplikovat optimalizační algoritmy. [17]

Simulace jsou i přes uvedený způsob modelování zatíženy chybou týkající se umístění a pozic vodičů v drážce, které při výrobě nelze kontrolovat. Uvedený problém se týká zejména modelů vinutí s několika paralelními vodiči či modelováním vsypávaného vinutí. 2D modely neumožňují simulaci čel vinutí a zároveň neumožňují simulovat transponované vodiče.

2D modely mohou vlivem zjednodušení nadhodnocovat ztráty, jelikož nezohledňují jevy působící ve třetí dimenzi či celou fyzikální realitu. Ztráty mohou být například nadhodnoceny magnetickým rozptylovým tokem, který je v oblasti čel vinutí vyšší než uvnitř drážky. Nadhodnocení ztrát 2D modelem může být způsobeno výpočtem magnetické indukce. Zjednodušený model či 2D model nestanoví kolísání magnetické indukce či pokles indukce směrem k výstupu vinutí z drážky (viz Obr. 2). 2D modely a hybridní metody navíc nestanovují nelineární rozložení magnetické indukce ve všech třech osách. Výsledkem takových modelů jsou vyšší hodnoty magnetické indukce vyjádřené konstantou po celé délce jedné strany cívky. Chyby modelů je možné korigovat použitím poloempirických korekčních metod.



Obr. 2: Rozložení magnetické indukce v cívice [17]

Zanedbání čel vinutí modelem způsobí pokles stejnosměrného odporu vinutí a nadhodnocení Eddy Current ztrát. V případě cívek s malou aktivní délkou vinutí bude zanedbání čel vinutí hrát velkou roli v nepřesnostech modelu, jelikož čela vinutí budou větší měrou přispívat ke vzniku stejnosměrných ztrát. Chybu lze redukovat aplikací korekčního činitele  $K_S$  [17]

$$K_S = 1 - \frac{\tanh \frac{\pi \cdot l_a}{d}}{\frac{\pi \cdot l_a}{d}} \quad (1.9)$$

### 1.2.2 3D modely

3D modely s minimálním zjednodušením mohou být nejpřesnější, jelikož umožní simulaci větší palety jevů působících na vinutí. 3D modely mohou simulovat čela vinutí a magnetickou indukci působící ve třech osách, ale nastavení modelů je složitější a výpočet simulace trvá nejdéle. V případě axiálních strojů je potřeba simulovat ztráty pomocí 3D modelů, jelikož se magnetická indukce mění jak v axiálním, tak i v radiálním směru. Bezdrážkové stroje je také potřeba modelovat 3D metodami, jelikož 2D metody příliš navyšují vypočtené ztráty (v rozmezí od 11 % do 28 %). [17]

### 1.2.3 Hybridní 2D a 3D modely

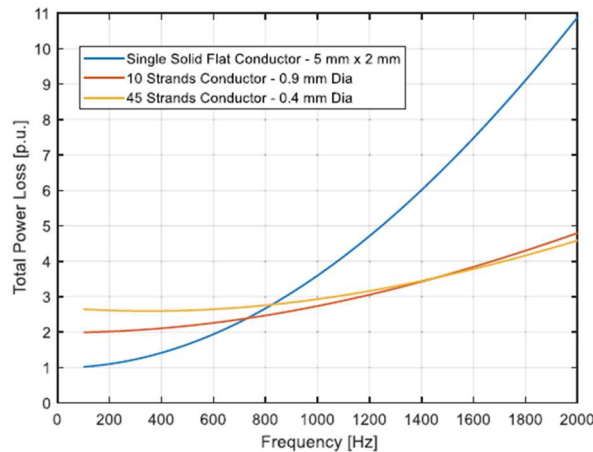
Výhodou hybridních modelů je až 40x rychlejší doba výpočtu simulace v porovnání s detailními modely vinutí, které poskytnou podobné výsledky. Této výhody se snaží využít hybridní metody, které nabízí jistý kompromis mezi přesností a rychlostí výpočtu.

Při použití hybridních metod jsou stanoveny vzorky magnetické indukce v různých bodech aktivní délky vinutí, které jsou následně použity pro výpočet ztrát analytickými rovnicemi. Výsledná hybridní metoda může svou přesností převyšovat čistě analytickou metodu, ale zároveň zanedbává působení jevů ve všech osách a je ovlivněna nepřesnostmi. Pro výpočet rozložení magnetické indukce postačuje hrubé nastavení sítě.

Tato metoda však nemusí být vždy použitelná kvůli rozdílným hodnotám magnetické indukce v jednotlivých částech stroje. V případě axiálních strojů mohou být odebrané vzorky hybridní metody natolik odlišné, že nemusí být vhodné pro popis celé cívky. [15, 17]

## 1.3 Možnosti omezení ztrát ve vinutí

Ze vzorců (1.3) a (1.4) je patrný vliv frekvence na velikost ztrát generovaných vířivými proudy. Jednotlivé úpravy vinutí mění v závislosti na frekvenci velikost ztrát generovaných vířivými proudy. Optimální pracovní oblast stroje bude závislá na designu stroje s redukovanými ztrátami. Stroje s komerčně vyráběnými vinutími ve velkých sériích bude výhodné provozovat při nízkých frekvencích. To ale nemusí platit pro stroje s redukovanými ztrátami od vířivých proudů. Takové stroje mohou vykazovat nižší ztráty od konkrétní frekvence a pod touto konkrétní hodnotou jejich provoz nebude výhodný. Například cívky s větším počtem paralelních vodičů nebo cívky vytvořené z hliníku bude výhodnější provozovat při vysokých frekvencích (například od frekvence 1 kHz a výše). [2, 5, 8] Tento fakt je znázorněn prostřednictvím Obr. 3 na následující straně.



Obr. 3: Vliv počtu paralelních vodičů a rozměru vodiče na velikost ztrát [8]

Z rovnic (1.3) a (1.4) je patrné, že nejvýraznějšího omezení ztrát lze docílit redukcí rozměrů vodiče. Potlačení ztrát je provedeno rozdělením vodiče do konečného počtu paralelních vodičů s průměrem vodiče menším, než je stanovená hloubka vniku. Vhodnou volbou rozměru vodiče a počtu paralelních vodičů se snažíme omezit vliv povrchového jevu a zajistit rovnoměrné rozložení proudové hustoty v závitě cívky. Rostoucí počet paralelních vodičů výrazně redukuje ztráty. Nicméně efekt omezení ztrát se vytrácí při dosažení vysokého počtu paralelních vodičů. Nevýhoda přístupu spočívá ve snížení plnicího faktoru (stanovuje poměr mezi plochou drážky a plochou zaplněnou vinutím), nárůstu výrobních nákladů a náročnosti výroby.

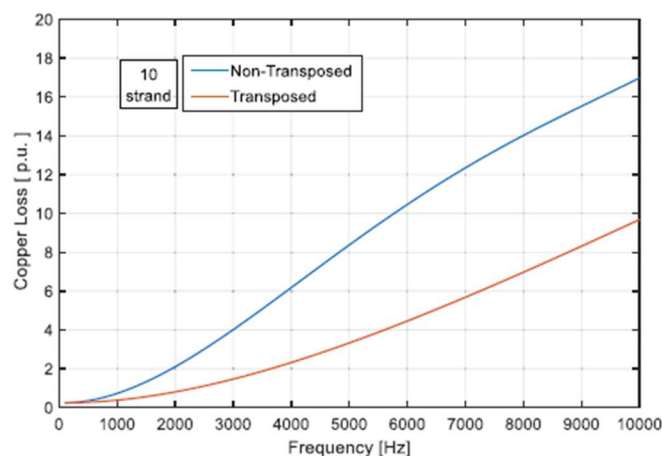
Pokles hodnoty plnicího faktoru se projevuje růstem velikosti stejnosměrného odporu. [2, 5, 6, 9] V oblasti vysokých frekvencí může být nízká hodnota plnicího faktoru nápomocná. Vinutí může vykazovat nižší ztráty generované vířivými proudy. Tento případ prokázala simulace navyšující tloušťky izolace v drážce. [8, 9]

Vinutí většiny elektrických motorů je navinuto z vodičů kruhového průřezu, které lze zakládat do libovolného tvaru drážky. Ve většině případů je použito vsypávané vinutí, které nemá kontrolované pozice jednotlivých vodičů v drážce. Náhodným umístěním vodičů do drážky může dojít k nárůstu ztrát ve vinutí. [5] Kruhový průřez vodiče je preferován pro nízkou výrobní cenu vinutí a jednoduchost výroby, ale vyráběná vinutí dosahují nízké hodnoty plnicího faktoru (35 % až 45 %) a mají dlouhá čela vinutí. [5, 6]

Závity rozdělené do velkého počtu paralelních vodičů (například 40) s miniaturním průřezem vodičů nevyužívají klasické vodiče kruhového průřezu. V takovém případě je využit průmyslově vyrobený svazkový vodič nazývaný Litz wire. Svazek bývá kroucený a ve většině případů má kruhový profil, ale vyskytují se i svazky obdélníkového průřezu. Litz wire má dobré mechanické vlastnosti, ale vinutí je drahou záležitostí. [5, 6]

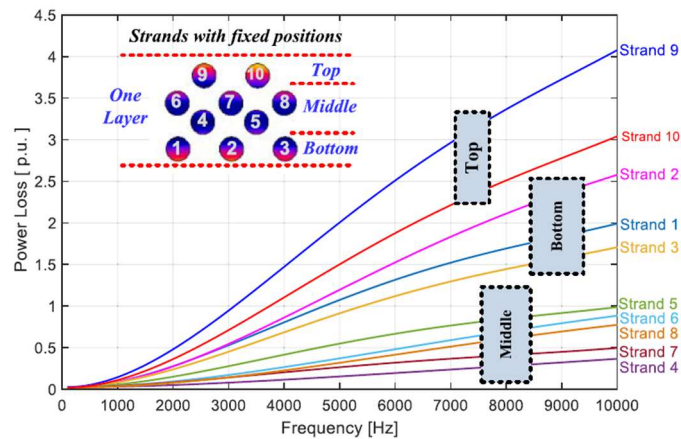
Vinutí zhotovené z vodiče obdélníkového průřezu je využíváno zejména v trakci či elektromobilitě. Vinutí využívající obdélníkový profil vodiče dosahuje vyšších hodnot plnicího faktoru a tepelné vodivosti než vinutí s kruhovým profilem vodičů, ale vykazuje vyšší ztráty generované vířivými proudy. Pozice jednotlivých vodičů je u navinutých cívek kontrolována a cívky je možné zakládat pouze do otevřených drážek. Výjimkou jsou Hairpin vinutí zakládána do drážek polouzavřených či uzavřených. Navíjení cívek je prováděno strojně. Délka čel vinutí je kratší v porovnání se vsypávaným vinutím. Délka čel se také projevuje na velikosti ztrát vinutí. Aktivními částmi vinutí a čely protéká totožný proud, který způsobuje v čelech ztráty. [5, 6]

Chování vinutí lze výrazně vylepšit transpozicí paralelních vodičů uvnitř drážky. Transpozice omezí tok cirkulačních proudů zmenšením rozdílů indukovaných napětí mezi jednotlivými paralelními vodiči. [5, 6, 8] Omezení ztrát pomocí transpozice vodičů znázorňuje Obr. 4.



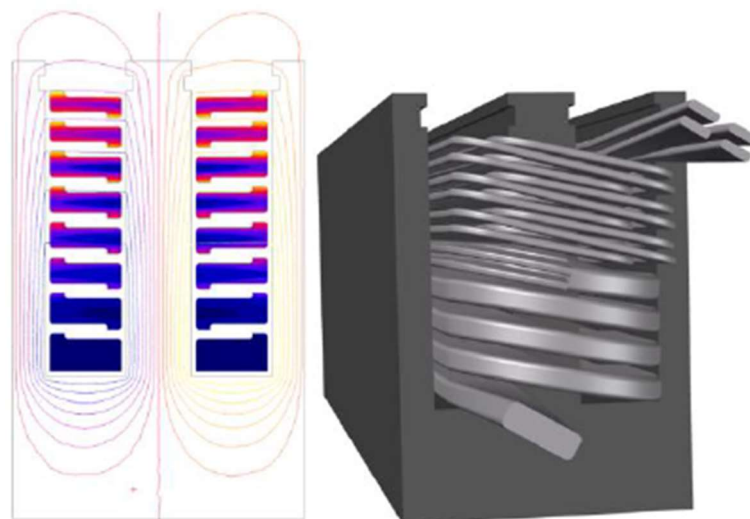
Obr. 4: Vliv transpozice vodičů na velikost ztrát [8]

Ztráty výrazně ovlivňuje rozptylový tok, jehož velikost je závislá na poloze uvnitř drážky. Maximální hodnoty dosahuje v otevření drážky a směrem ke dnu drážky klesá. Závity v blízkosti otevření drážky se podílí na 70 % ztrát vzniklých vířivými proudy. Zároveň záleží na pozici vodiče v závitě. Rozdíly rozptylových toků mezi horními a dolními paralelními vodiči v závitě způsobují vznik proximity efektu. Paralelní vodiče na obou krajích závitu vykazují vyšší ztráty než paralelní vodiče ve středu závitu, což je znázorněno na Obr. 5 umístěném na následující straně. Vliv rozptylového toku omezíme odsunutím vinutí od otevření drážky, čímž dojde opět ke snížení plnicího faktoru [2, 8, 9]. Situaci lze vylepšit vložením semimagnetických klínů do otevření drážky. Semimagnetické klíny omezují ztráty vířivými proudy a ztráty v permanentních magnetech. [7]



Obr. 5: Vliv polohy paralelních vodičů uvnitř závitu na velikost ztrát [8]

Optimalizace tvaru vodiče omezí interakci vinutí s rozptylovým tokem. Výroba speciálních tvarů vodičů je realizována aditivními technologiemi výroby (tavení elektronovým paprskem, selektivní laserové tavení, 3D mikroextruzí). Tištěné vodiče bývají následně žíhány, aby bylo omezeno pnutí a zlepšily se elektrické vlastnosti materiálu. Tvarováním vodiče se snažíme docílit profilu rovnoběžného s rozptylovým tokem. Příkladem může být tištěná cívka profilu Z s proměnou výškou vodičů závislou na poloze v drážce. Z profil rovnoměrněji rozděluje proudovou hustotu ve vodiči. Výška vodiče klesající směrem k otevření drážky omezí vliv rozptylového toku v blízkosti otevření drážky. Aditivními technologiemi je možné také vytisknout cívku, která je u dna drážky tvořená jedním vodičem a u otevření drážky je rozdělena do několika transponovaných paralelních vodičů. Příklady obou cívek jsou zobrazeny na Obr. 6. [5, 6]



Obr. 6: Příklady cívek vyrobených aditivními technologiemi [5]

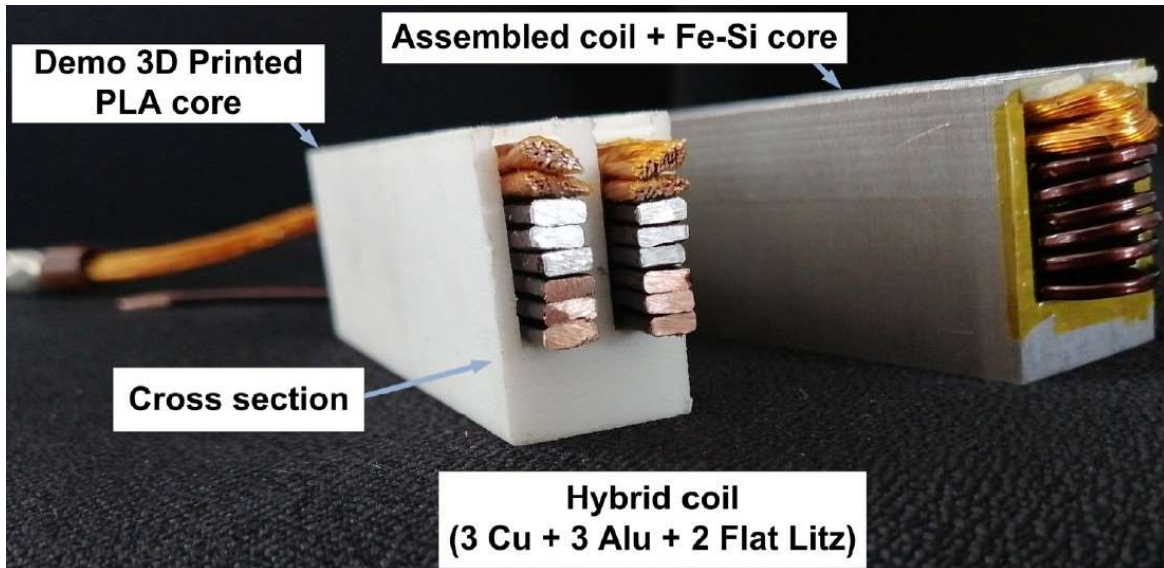
Tisk je možné provádět z mědi, hliníku, stříbra nebo slitin (například AlSi10Mg, CuCr1Zr). [5] Aditivními technologiemi lze vyrábět také chladicí kanály ve vodičích nebo kroucené Roebelovy tyče, jejichž výroba je konvenčními způsoby náročná. [5, 6] Cívky vyrobené aditivními technologiemi je nutné dále opracovat. Pro dosažení požadovaných vlastností materiálu je nutné cívky žíhat a provést povrchovou úpravu. Izolace cívek je vytvořena dodatečně ponořením do lázně s lakem. [18]

Volbou materiálu lze také měnit velikost ztrát. Alternativou měděných vinutí mohou být vinutí vyrobená z hliníku. Hliník má oproti mědi větší rezistivitu a je lehčí. Hliníkové vinutí bude vykazovat vyšší ztráty v oblasti nízkých frekvencí. V oblasti vysokých frekvencí (nad 1000 kHz) bude vinutí vyrobené z hliníku vykazovat nižší ztráty než vinutí z mědi za stejných podmínek (za stejného plnicího faktoru, parametrů vinutí a velikosti protékaného proudu). [2, 5] Je možné sestavit vinutí, které využívá část vodičů z mědi uložených u dna drážky a část vodičů vyrobených z hliníku umístěných u otevření drážky. Taková cívka bude vykazovat ponížené ztráty ve vinutí, ale pro návrh bude nutné použít optimalizační úlohu v simulačním softwaru. [8]

Dalšími zajímavými materiály mohou být hliníkové vodiče plátované mědí či pro speciální aplikace měděné vodiče plátované stříbrem nebo potažené niklem. Pro speciální aplikace lze použít i uhlíkové nanotrubičky (dále CNT) a grafen. Výhodou obou materiálů je vysoká vodivost s nízkou hmotností a nízkým teplotním koeficientem. Vinutí z CNT není ovlivněno skin efektem. Další alternativou mohou být kompozitní materiály kombinující CNT s mědí (CNT-Cu). Kompozitní vodič CNT-Cu v porovnání s měděným vodičem vykazuje nižší hmotnost, vyšší vodivost a vyšší proudovou zatížitelnost. Vodivost CNT-Cu vodičů s rostoucí teplotou klesá pomaleji než u měděných vodičů. [6]

Výrazná redukce ztrát je dosažitelná hybridními cívkami. Příkladem může být již zmíněná cívka využívající hliníkových závitů v blízkosti otevření drážky a měděných závitů u dna drážky. Myšlenka využití hybridních cívek spočívá v hledání optima závislého na pozici závitů v drážce, při kterém by zvolené úpravy co nejlépe redukovaly ztráty. Například závity tvořené jedním paralelním vodičem z mědi je nejvíce výhodné užívat u dna drážky, kde nepůsobí rozptylový tok a neprojevuje se výrazně proximity efekt. Litz wire nebo Roebelova tyč bude vykazovat nejmenší ztráty u otevření drážky, ale směrem ke dnu drážky budou ztráty narůstat. Vrstvy vinutí uprostřed drážky již vykazují pro uvedené úpravy podobné ztráty. Přesto tato oblast může být navinuta z hliníkových závitů, které umožní dodatečnou redukci ztrát. Výsledné cívky mohou redukovat ztráty v rozmezí od 16 % do 40 % a zároveň redukovat váhu cívek o 36 % až 70 %. [18]

Příklady hybridních cívek jsou zobrazeny na Obr. 7. Uvedený experiment neřešil problémy týkající se hromadné výroby cívek či jejich aplikací do praxe. Je však zřejmé, že cena hybridních cívek bude výrazně vyšší než cívek konvenčních. Použití hybridních cívek vyžaduje kromě komplexní výroby také vhodnou volbu navzájem kompatibilních materiálů, důkladný návrh a testování. [18]



Obr. 7: Příklad hybridních cívek [18]

Ztráty generované vířivými proudy je možné omezit v průběhu návrhu stroje změnou poměru výšky permanentních magnetů a vzduchové mezery. Snížení výšky permanentních magnetů spolu s rozšířením vzduchové mezery se projeví v návrhu stroje nižšími hodnotami rozptylového toku v otevření drážky, ale také výrazným snížením výstupního výkonu navrhovaného stroje. [7]

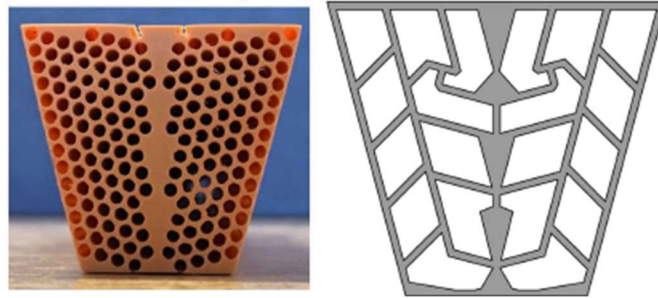
Tvar a rozměry otevření drážky mění velikost rozptylového toku. Zúžením otevření drážky, zvýšením sklonu a vyšším krčkem lze omezit ztráty generované vířivými proudy. Zvolený přístup se negativně projeví výraznějším zvlněním momentu a způsobí větší sycení magnetických plechů v oblasti krčků. Některé volené hodnoty zešikmení krčku a jeho výšky mohou způsobit i nechtěné navýšení ztrát, proto je nutné provádět rozsáhlejší analýzu v případě použití daného přístupu [7]. Vinutí umístěné do polouzavřené drážky může vykazovat nepatrně vyšší ztráty než vinutí umístěné do otevřené či uzavřené drážky. Vinutí v polouzavřené drážce je vystaveno silnějšímu rozptylovému toku. [8]



Vliv magnetizace permanentních magnetů na velikost ztrát vířivými proudy je slabý. Porovnání Halbachova pole s radiální a paralelní magnetizací pouze dokázalo, že se jedná o neefektivní přístup omezující ztráty vířivých proudů. Halbachovo pole vykazuje vůči ostatním magnetizacím vyšší výstupní výkon, ale také větší nebo podobnou velikost ztrát ve vinutí. Paralelní a radiální magnetizace způsobuje téměř shodné ztráty ve vinutí. [7]

Způsob umístění vodičů do drážky je nejspíše poslední možností umožňující omezení ztrát generovaných vířivými proudy. Vinutí uložené do jedné vrstvy vykazuje nižší ztráty do oblasti 5 kHz. Naopak vinutí uložené do drážky ve dvou vrstvách vedle sebe bude vykazovat nižší ztráty nad 5 kHz [8]. Vodiče zhotovené z obdélníkového profilu mají definované pozice vodičů z výroby a zakládáním vinutí do drážek se pozice nemění. To neplatí pro vodiče kruhového průřezu, jejichž poloha v drážce je spíše náhodná a tvar založeného závitu není možné kontrolovat. Polohu jednotlivých vodičů lze ukotvit drážkovou vložkou. Vložky jsou pouze experimentálním řešením. [18]

Výroba vložek zobrazených na Obr. 8 se provádí 3D tiskem. Vložky mohou mít vytištěné otvory pro jednotlivé vodiče, které mají vždy fixní polohu. Alternativou jsou vložky s otvory tištěnými pro fixní tvar jednotlivých závitů, ve kterých může být poloha vodičů proměnná. Vložky s fixním tvarem závitu umožňují snadnější a rychlejší navíjení cívek. Pozice samotného paralelního vodiče v drážce nemá výrazný vliv na velikost ztrát, ale výrazný vliv na ztráty má tvar vloženého závitu. [9]

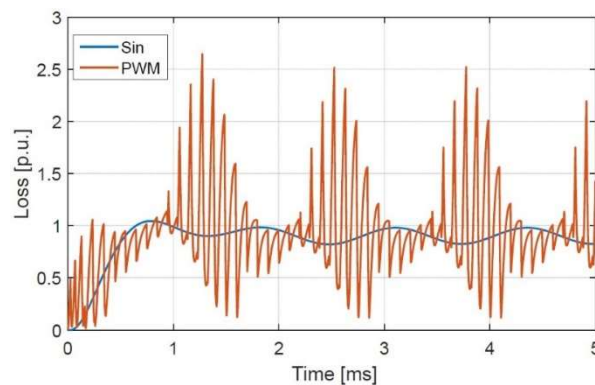


Obr. 8: Drážková vložka pro kontrolu pozic jednotlivých vodičů (obrázek v levo). Drážková vložka pro fixaci tvaru závitu (obrázek v pravo) [9]

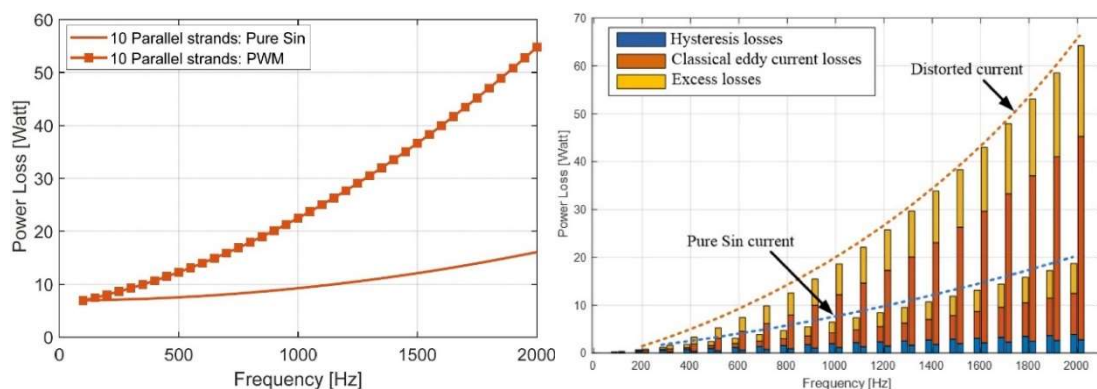
Výše uvedené možnosti omezení ztrát ovlivňují i jiné parametry elektrických motorů. Výrazně je ovlivňován výstupní výkon motoru, který klesá spolu se ztrátami. Nejvíce je omezen výstupní výkon při změnách magnetizace PM, při změnách výšek PM a vzduchové mezery (až 20 %). Nejméně výstupní výkon omezuje posun vinutí od otevření drážky a dělení závitu na více paralelních vodičů (do 5 %). Jednotlivé postupy mají různé efekty na odlišné stroje. Stroje lišící se počtem drážek, počtem pólů a typem vinutí budou vykazovat rozdílné chování z hlediska omezení ztrát vířivými proudy ve vinutí. [7]

Uvedené úpravy vinutí jsou určeny pouze k vylepšení stávajících konstrukcí vinutí. Ztráty generované elektrickým strojem je potřeba primárně omezit již v prvotním návrhu vinutí. Při návrhu je stále nutné hledět na zkrácení kroku vinutí či kvalitu generované stupňovité křivky, aby vinutí generovalo pokud možno co nejnižší ztráty.

Všechny dosud uvedené úpravy byly měřeny a simulovány při sinusovém napájení. V praxi jsou převážně elektrické stroje napájeny z měničů pomocí PWM modulace. Aplikací PWM modulace vznikají ztráty způsobené pracovní harmonickou, které jsou doplněny o ztráty způsobené harmonickými složkami vyšších řádů (viz Obr. 9). Vinutí napájené pomocí PWM bude vykazovat v oblasti otevření drážky vyšší hodnoty proudové hustoty než v případě sinusového napájení totožné RMS hodnoty. Vinutí napájené PWM v blízkosti otevření drážky generuje 75 % celkových ztrát. Sinusové napájení ve stejné oblasti vygeneruje 70 % celkových ztrát. V simulacích použitím PWM signálu o frekvenci 100 Hz došlo k nárůstu celkových ztrát téměř o 30 % a nárůstu proudové hustoty ve vinutí až o 50 %. [18] Obr. 10 zobrazuje průběhy ztrát způsobené napájením v závislosti na frekvenci.



Obr. 9: Průběh ztrát při PWM modulaci [18]



Obr. 10: Průběh ztrát ve vinutí při sinusovém a PWM napájení (vlevo), ztráty v železe při PWM a sinusovém napájení (vpravo) [18]

Z uvedených simulací je patrné navýšení ztrát při použití PWM modulace. Ztráty stroje bez ohledu na typ napájení rostou s kvadrátem frekvence.

## 2 Modelování

### 2.1 Volba vzorku a návrh vinutí

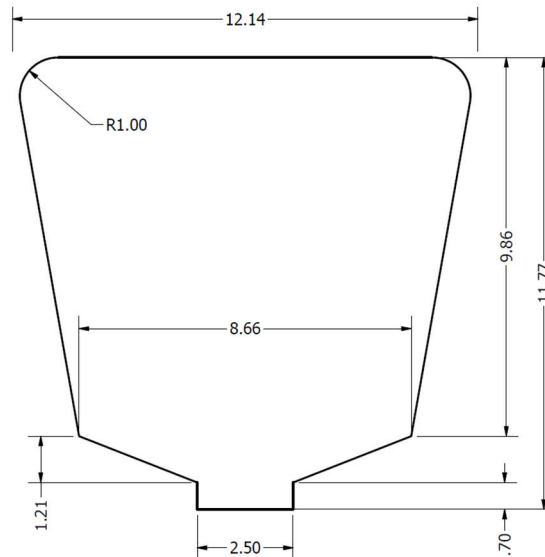
Pro potřeby vlastního výzkumu byl využit návrh elektrického stroje provedený panem Ing. Zdeňkem Frankem [10]. Z této práce přejímám pouze existující statorový paket, který mi byl panem Frankem poskytnut. Paket slouží k tvorbě vzorků a modelu magnetického obvodu. Rozměry vzorku jsou uvedeny v Tab. 1 a v Obr. 11. Možnou alternativou ke zvolenému řešení je vytvoření vzorků magnetického obvodu z nastříhaných transformátorových plechů tvaru E viz [2].

Volba statorového paketu byla provedena kvůli úspoře času a nákladů. Výhoda zvoleného řešení spočívá v kompaktním provedení vzorku pro potřeby měření, kde je na jednom magnetickém obvodu vytvořeno několik rozdílných cívek. Díky zvoleným rozměrům a kompaktnímu provedení bude vytvořený vzorek vhodný pro budoucí potřeby výuky laboratorních cvičení. Nevýhoda zvoleného řešení spočívá v obtížném stanovení ztrát v železe.

Použitím vzorku z vystřižených transformátorových plechů se lze vyhnout problémům se stanovením ztrát v železe. Pro jejich stanovení lze použít Epsteinův rám. Nevýhoda řešení spočívá v nutnosti zhotovení většího množství vzorků magnetického obvodu pro potřeby navíjení. I této nevýhodě se lze vyhnout volbou otevřené drážky a cívky navinuté na kostře, kterou lze snadno vyjmout.

Tab. 1: Parametry statorového paketu

délka statorového paketu $l_{Fe}$ (mm)	50
vnější průměr statoru $D_{1e}$ (mm)	120
vnitřní průměr statoru $D_{1i}$ (mm)	84,5
počet drážek statoru $Q$	18
šířka statorového zubu $b_z$ (mm)	6,8
plocha statorové drážky $S_d$ (mm <sup>2</sup> )	108,655



Obr. 11: Rozměry drážky použitého statoru

Statorové drážky použitého magnetického obvodu jsou polouzavřené a velikost otevření drážky je 2,5 mm. Rozměry drážky a otevření drážky vedou na nutnost návrhu vsypávaného vinutí. Vsypané vinutí je vhodné pro ruční výrobu, umožňuje použití vodičů tenkého průměru, ale dosahuje nižších hodnot činitele plnění drážky. Obecně vyšších hodnot plnění dosahují cívky vyráběné strojně z prefabrikovaných profilů. Velikost činitele plnění drážky je závislá na typu použitého vinutí, výrobě vinutí a provozním napětí (rozměrům izolace cívky) [11]. Strojně navíjená vinutí z válcových vodičů mohou dosahovat plnění drážky  $K_t$  až 0,5. Pro potřeby ručního navíjení je jistější volit nižší hodnoty plnění. Uvažované konfigurace cívek byly navrhovány pro činitel plnění  $K_t = 0,4$ , který je snáze dosažitelný ručním navíjením. Pro stanovení koeficientu plnění drážky je nutné znát plochu drážky. Plocha drážky statoru byla odečtena z modelu vytvořeného v Ansysu. Plocha drážky voleného paketu  $S_d$  je  $108,655 \text{ mm}^2$ .

Vhodné konfigurace cívek pro navíjení jsou uvedeny v Tab. 2. Průměry vodičů pro navíjení cívek byly voleny z materiálu nacházejícího se v inventáři fakulty. Při výběru vhodných vodičů byl brán ohled na snadné navíjení cívek. Veškeré konfigurace uvažují použití vodičů o průměru 1,25 mm a menších, které se snadno ohýbají. Průměry v rozmezí 1,8 mm až 1,32 mm nebyly pro návrh využity. Návrh cívek předpokládá použití dvouvrstvého zubového vinutí, které má malé rozměry čel vinutí.

Tab. 2: Navržená konfigurace cívek

$d$ (mm)	$n_p$	$N$	$S_c$ (mm <sup>2</sup> )	$K_t$ (%)
1,25	1	36	44,179	40,660
1	2	36	56,549	52,044
0,9	2	36	45,804	42,156
0,8	3	36	54,287	49,963
0,71	3	36	42,759	39,353
0,5	6	36	42,412	39,033
0,45	8	36	45,804	42,156

Plocha cívek  $S_c$

$$S_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot N \cdot n_p = \frac{\pi \cdot 1,25^2}{4} \cdot 36 \cdot 1 = 44,179 \text{ mm}^2 \quad (2.1)$$

Vzorec je uvažován pro dvouvrstvé vinutí a počítá plochu obou vrstev vinutí vložených do drážky. Použitý vzorec je platný i pro jednovrstvé vinutí.

Činitel plnění drážky  $K_t$

$$K_t = \frac{S_c \cdot 100}{S_d} = \frac{44,179 \cdot 100}{108,655} = 40,66 \% \quad (2.2)$$

Návrh cívek byl proveden celkem pro 12 různých konfigurací cívek, které se liší počtem paralelních vodičů, počtem závitů a volenými průměry vodičů.

Kombinaci průměrů a počtu paralelních drátů v Tab. 2 volím kvůli největší paletě výběru dostupných vodičů pro navíjení ze všech vypracovaných návrhů cívek. Zároveň Tab. 2 umožňuje navinout cívky s jedním paralelním vodičem a nižším počtem závitů. Jiné konfigurace pro dosažení stejného plnění potřebovaly větší počet paralelních vodičů a více závitů. Volba nižšího počtu závitů je vhodnější pro potřeby experimentu. Větší počet závitů by prodlužoval přípravu modelů, dobu simulace a zvyšoval nároky na výpočetní hardware.

Z Tab. 2 byly pro další zkoumání zvoleny cívky navinuté z vodiče o průměru 1,25 mm, 0,9 mm a 0,71 mm. Ostatní cívky uvedené v tabulce nejsou uvažovány kvůli vysokému činiteli plnění drážky  $K_t$  nebo kvůli vysokému počtu paralelních vodičů. Rostoucí počet paralelních vodičů prodlužuje výrobu cívek a zvyšuje náročnost navíjení. Pro ruční navíjení jsem uvažoval pouze návrhy s maximálním počtem paralelních vodičů  $n_p = 6$ , které by již bylo obtížné navinout.

Při navíjení experimentální cívky z vodiče o průměru 1,25 mm nebylo dosaženo požadovaného počtu závitů. Do drážky se podařilo umístit pouze 32 závitů dvouvrstvého vinutí. Kvůli tomuto problému byla provedena redukce závitů u všech konfigurací z Tab. 2. Výsledné konfigurace cívek jsou uvedeny v Tab. 3.

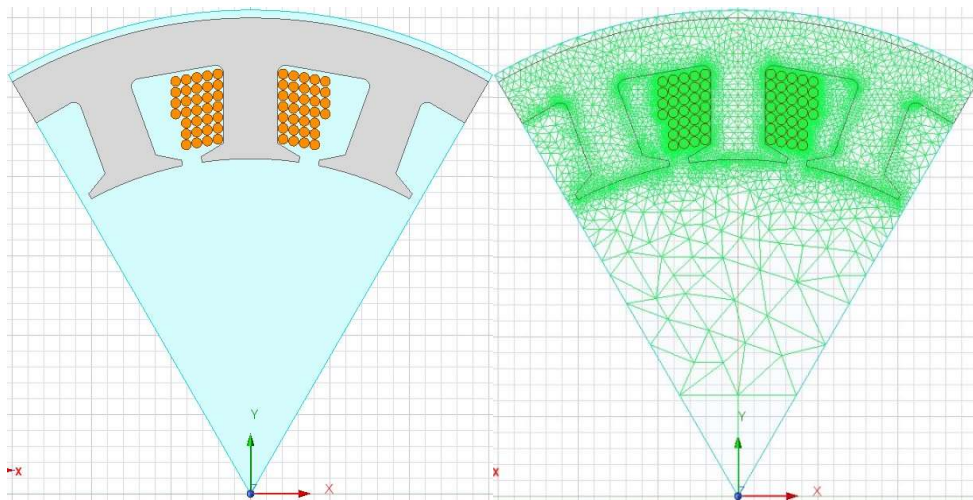
Tab. 3: Konfigurace cívek po redukcí počtu závitů

$d$ (mm)	$n_p$	$N$	$S_c$ (mm <sup>2</sup> )	$K_t$ (%)
1,25	1	32	39,270	36,142
1	2	32	50,265	46,262
0,9	2	32	40,715	37,472
0,8	3	32	48,255	44,411
0,71	3	32	38,008	34,981
0,5	6	32	37,699	34,696
0,45	8	32	40,715	37,472

Standardní návrh cívek vedoucí ke stanovení činitelů vinutí a stupňovité křivky magnetické indukce ve vzduchové mezeře nebyl proveden. Pro potřeby experimentů bude vždy využita a napájena jedna cívka. Pro zvolené konfigurace nebude navíjen celý stator, ale vždy pouze jedna drážka statoru.

## 2.2 Šablona modelu

Pro účely modelování byla vytvořena šablona obsahující magnetický obvod a nastavení modelu, která jsou přenesena do ostatních modelů. Podobu šablony modelu zobrazuje Obr. 12. Magnetický obvod byl modelován podle obdrženého vzorku statorového paketu. Modely byly vytvořeny a simulovány v programu Ansys Electronics Desktop. Modely jsou počítány Eddy Current simulací pro 53 různých frekvencí od 10 Hz do 300 kHz. Frekvence v tomto pásmu umožňuje měřit použitý LRC metr. Uvedený rozsah byl zvolen kvůli měření pracovní harmonické, ale také kvůli měření harmonických vyšších řádů, které se mohou objevit ve vinutí vlivem spínací frekvence měniče.



Obr. 12: Příklad vytvořeného modelu (obr. vlevo), Síť modelu (obr. vpravo)

Šablona obsahuje pouze 1/6 statorového paketu. Konkrétně tři zuby a tři drážky statoru. Téměř všechny modely neobsahují rotor a magnety z návrhu pana Ing. Franka. Modelování části statoru bez rotoru výrazně urychlí dobu výpočtu modelů a výrazně snižuje počet uzlů sítě. Světle modrá oblast představuje okolí modelu, kterému byly přiřazeny materiálové vlastnosti vzduchu. Pro stator je nastaven z knihovny materiálů plech DW540\_50. Materiálu je přiřazen ztrátový model elektrické oceli definovaný koeficienty Steinmetzovy rovnice  $k_h = 268$  a  $k_c = 0,822$ . Koeficienty jsou přednastavené v knihovně materiálů. Relativní permeabilita materiálu  $\mu_r$  je zadána B/H charakteristikou zvoleného materiálu. Vinutí byla přiřazena z knihovny materiálů měď.

Rozměry modelu jsou nastaveny ve shodě s realitou. Vnějšímu okraji vzduchové obálky byl nastaven nulový vektorový potenciál. V modelu jsou nastaveny symetrie přiřazené bokům kruhové výseče. Násobitel symetrie je nastaven na hodnotu 1. Symetrie jsou nastaveny pomocí opačně orientovaných podmínek Dependent a Independent. Uvedené nastavení zajistí symetrické chování modelu a zobrazuje pouze ztráty namodelované výseče. Nastavením násobitele na hodnotu 6 by došlo zobrazení ztrát celého symetrického modelu.

Výpočet ztrát modelu je zajištěn nastavením Eddy effects na veškeré vodiče modelu a nastavením ztrát v železe na statorový paket. Bez uvedených nastavení model ztráty nepočítá.

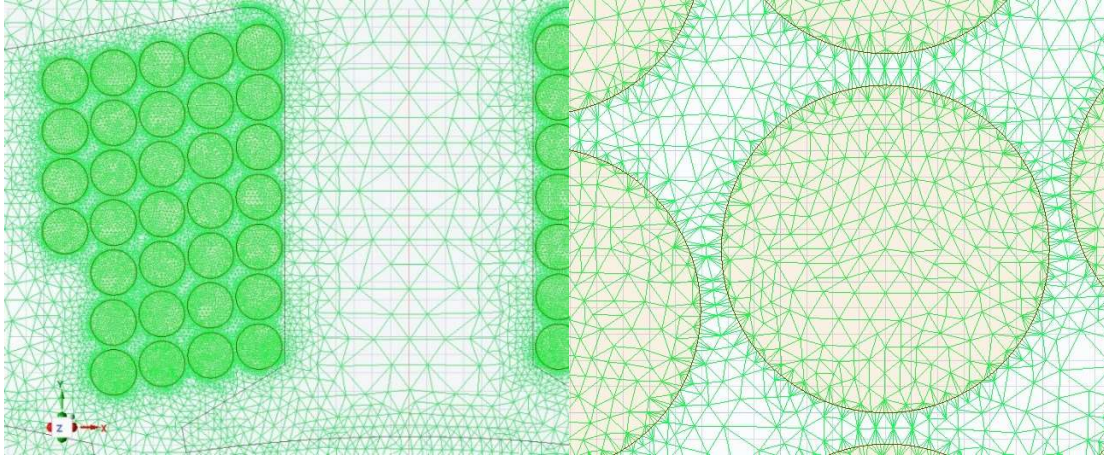
Modelu je přiřazeno vinutí tvořené všemi modelovanými vodiči. Pro všechny modely je dodrženo jednotné nastavení vinutí, kde vodiče na levé straně zubu mají přiřazenou negativní polaritu cívky a vodiče na pravé straně zubu pozitivní polaritu. Jeden modelovaný vodič představuje pro většinu simulací jeden vodič fyzicky umístěný do drážky. Pouze v simulacích s paralelními vodiči dané nastavení neplatí. Vinutí je v simulaci napájeno efektivní hodnotou sinusového proudu. Je možné experiment provádět i při simulovaném napájení pomocí PWM modulace. Pro PWM napájení je však potřeba nastavit Transientní simulaci. Modely budou vykazovat totožné chování, ale budou se lišit velikostí ztrát. Při napájení PWM modulací budou celkové ztráty navýšeny o přídavné ztráty, které bude při vyhodnocení obtížné oddělit od celkových ztrát či ztrát vinutí.

Standardní způsob modelování vinutí, který nahrazuje jednotlivé vodiče ekvivalentní plochou není pro potřeby experimentu vhodný. Modelování jednotlivých vodičů umožňuje stanovit rozložení proudu v jednotlivých vodičích a přesněji stanovit generované ztráty. Při střídavém napájení vzniká ve vodičích nelineární rozložení proudu, které je potřeba nasimulovat. Všechny vodiče byly umístěny v modelech ručním nastavením souřadnic.

Výchozí nastavení sítě je nastaveno pro generování jemnější sítě. Dodatečně jsou nastavena další zjemnění sítě na jednotlivé prvky simulace. Vnitřní plocha statoru má nastavenou maximální velikost elementu 2 mm. Pro vnitřní okraje statoru je nastavena maximální velikost elementu 0,5 mm. Nastavení generuje nadstandardně jemnou síť pro obvyklé potřeby modelování elektrických strojů. Velikost elementů uvnitř vodičů je nastavena na hodnotu odpovídající 1/10 průměru vodiče. Příklad generované sítě je uveden na Obr. 13 na následující straně.



Ansyes je schopen řešit zvolenou fyzikální problematiku i v poloviční vzdálenosti mezi uzly sítě. Nastavená síť je touto vlastností výrazně zjemněna. Zvolené nastavení sítě spolu se způsobem modelování jednotlivých vodičů vede na vysoké hardwarové požadavky a dlouhou dobu simulace.



Obr. 13: Generovaná síť (obrázek vlevo), detail sítě v oblasti vinutí (obrázek vpravo)

Síť výchozího modelu tvoří 91 tisíc elementů. Energie je v modelu počítána s chybou 0,3 %. Ztráty jsou počítány s chybou v řádu  $10^{-23}$  %.

Modely jsou simulovány na výpočetním serveru, který disponuje 48 logickými jádry a 490 GB operační paměti. Pro generování sítě je potřeba dostatečná velikost operační paměti, kterou výpočetní server disponuje. Vytvořené modely lze spustit i na obyčejné sestavě s velikostí RAM cca 16 GB. Je však potřeba vzít v úvahu překročení velikosti operační paměti, které způsobí ukládání dat sítě na pevný disk počítače. Velikost uložených dat na pevném disku může dosahovat řádově stovek GB. Doba simulace na osobním počítači s 8 logickými jádry procesoru může trvat v řádu jednotek hodin. Výpočetní server zvládá spočítat stejnou simulaci v řádu jednotek až desítek minut.

### 2.3 Vliv zjednodušení modelu na velikost ztrát

Simulace jedné cívky jsou velice vzdálené od reality, která nastává v plně navinutém stroji s rotorem a magnety. Tato podkapitola není pro experiment nijak zásadní, nicméně poskytuje přehled o odchylce celého experimentu od reality.

Na simulacích diskutovaných v této podkapitole bylo ověřeno správné nastavení výchozí šablony použité pro všechny ostatní modely. Ověření probíhalo na modelech se třemi fázemi a jednou fází, které byly simulovány jak Transientně, tak pomocí Eddy Current simulace. Simulace byly z časových důvodů zkoumány pouze do 20 kHz.

### 2.3.1 Simulace třífázového napájení s vloženým rotorem

Simulace jsou provedeny pro cívky o 18 závitů navinuté z vodiče o průměru 1,25 mm. Jedna cívka zubového dvouvrstvého vinutí představuje v modelu jednu fázi. Rotor s magnety je namodelován podle rozměrů z návrhu pana Ing. Franka. Geometrie rotoru byla pouze zjednodušena do podoby mezikruží, které neobsahuje rotorové zuby z původního návrhu. Magnety mají definovaný vlastní materiál. Parametry materiálu magnetů a rozměry rotoru s magnety jsou uvedeny v Tab. 4 a Tab. 5.

Model 1/6 stroje obsahuje tři cívky vinutí a dva rotorové magnety opačné magnetizace. 1/6 stroje představuje nejmenší možný modelovatelný úsek pro vytvoření symetrického modelu celého stroje. Vířivé proudy indukované v magnetech a jimi vzniklé ztráty nejsou modelem počítány.

Tab. 4: Parametry materiálu magnetů

hustota magnetu $\rho_{mag}$ (kg/m <sup>3</sup> )	7400
vodivost $\gamma$ (MS/m)	0,625
koercitivní intenzita magnetického pole $H_c$ (kA/m)	-890
relativní permeabilita $\mu_r$	1,0998

Tab. 5: Rozměry rotoru, magnetů a vzduchové mezery

vnější průměr rotoru $D_{2e}$ (mm)	77
vnitřní průměr rotoru $D_{2i}$ (mm)	61
výška magnetu $h_{pm}$ (mm)	3
šířka magnetu $b_{pm}$ (mm)	18
výška vzduchové mezery $\delta$ (mm)	0,75

Model je napájen efektivní hodnotou sinusového proudu o velikosti 3,8 A. Proudová hustota ve vinutí je 3,097 A/mm<sup>2</sup>.

Modelovaný proud fáze

$$I_f = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot Time + \varepsilon) \quad (2.3)$$

Time je simulační čas ve kterém probíhá výpočet simulace,  $\varepsilon$  představuje fázový posun třífázového symetrického systému.

Doba simulace a krok simulace modelu se odvíjí od vyšetřované frekvence. Pro všechny frekvence model počítá tři periody signálu. V každé periodě signálu je počítáno 100 vzorků.

Perioda signálu pro frekvenci 10 Hz

$$T = \frac{3}{f} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ s} \quad (2.4)$$

Krok simulace pro frekvenci 10 Hz

$$\Delta t = \frac{T}{3 \cdot 100} = \frac{0,3}{3 \cdot 100} = 0,001 \text{ s} \quad (2.5)$$

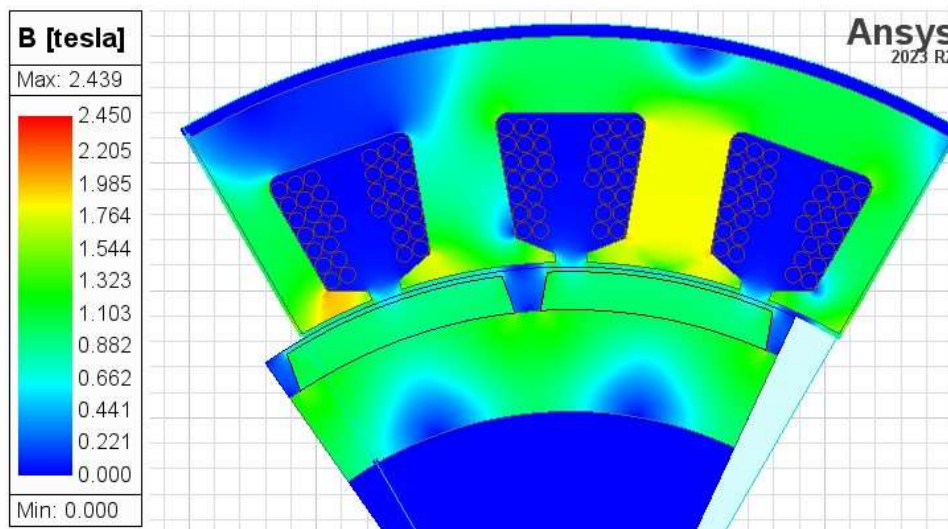
Pro rotor a magnety byl vytvořen Motion Setup. Výchozí pozice rotoru je natočena o 5 stupňů vůči statoru. Osa rotace byla nastavena do osy Z. Otáčky v simulaci jsou opět závislé na frekvenci napájecího proudu.

Otáčky rotoru při frekvenci 10 Hz

$$\omega_r = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{10 \cdot 60}{6} = 100 \text{ ot/min} , \quad (2.6)$$

kde  $p$  je počet pólových dvojic.

Síť modelu je doplněna o zjemnění ve středu vzduchové mezery. Velikost elementu sítě je nastavena na 0,1 mm. Rotující části modelu jsou mapovány s úhlem  $3^\circ$  (v simulaci Cylindrical Gap Treatment).

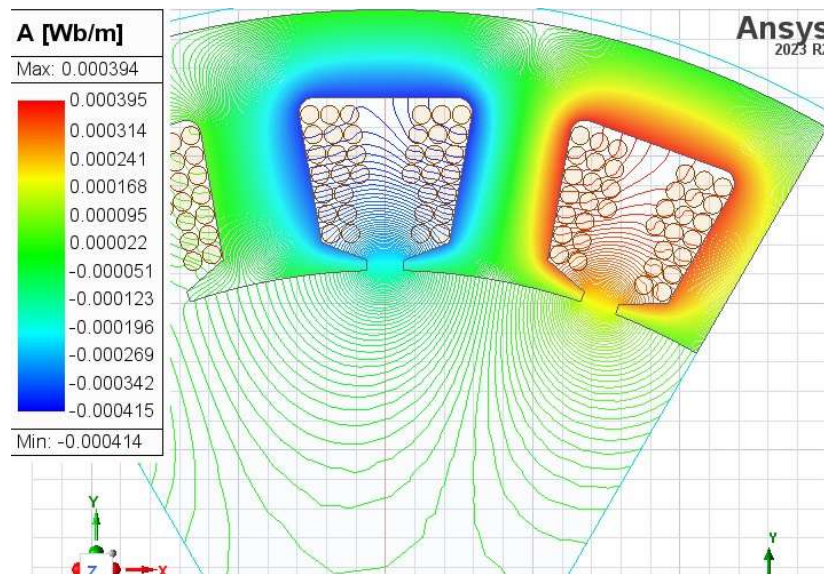


Obr. 14: Rozložení magnetické indukce B v modelu kompletního stroje

Výsledky modelu s rotorem jsou porovnány s modely bez rotoru v podkapitole 2.3.2. Na Obr. 14 je znázorněno rozložení magnetického pole v modelu.

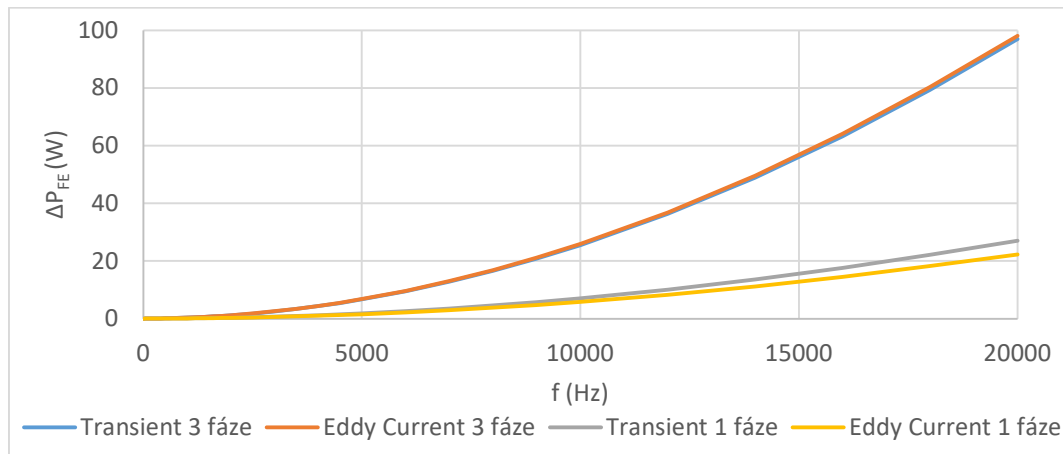
### 2.3.2 Výsledky srovnání

Odstranění rotoru z modelu způsobí pokles sycení magnetického obvodu statoru a magnetického toku, který se začne uzavírat vzduchem. Ovlivněn bude i rozptylový magnetický tok, který poklesne o příspěvek od rotorového magnetického obvodu a začne se uzavírat skrz drážky stroje. Odebráním dvou fází dochází opět k poklesu sycení statoru.



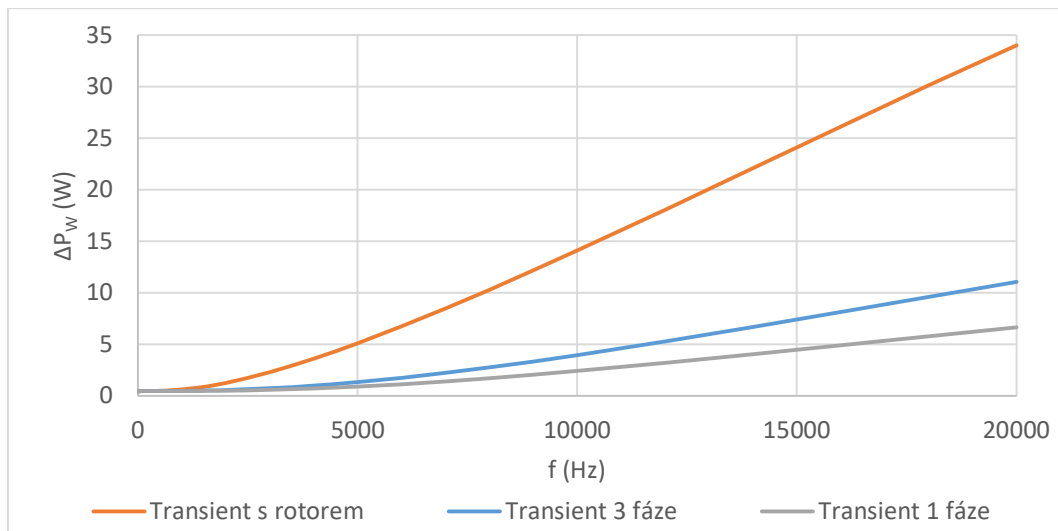
Obr. 15: Dráhy rozptylového toku po odstranění rotoru z modelu

Vlivem poklesu sycení magnetického obvodu dochází k poklesu ztrát v železe (viz Obr. 16). Plný model stroje dosahuje ve zkoumaném rozsahu frekvencí ztráty v řádech desítek kW. Po odstranění rotoru a magnetů modely vykazují ztráty v železe v řádu desítek W. Model obsahující jednu fázi stroje vykazuje zhruba  $\frac{1}{4}$  ztráty v železe oproti modelu se třemi fázemi.



Obr. 16: Ztráty v železe simulací bez rotoru

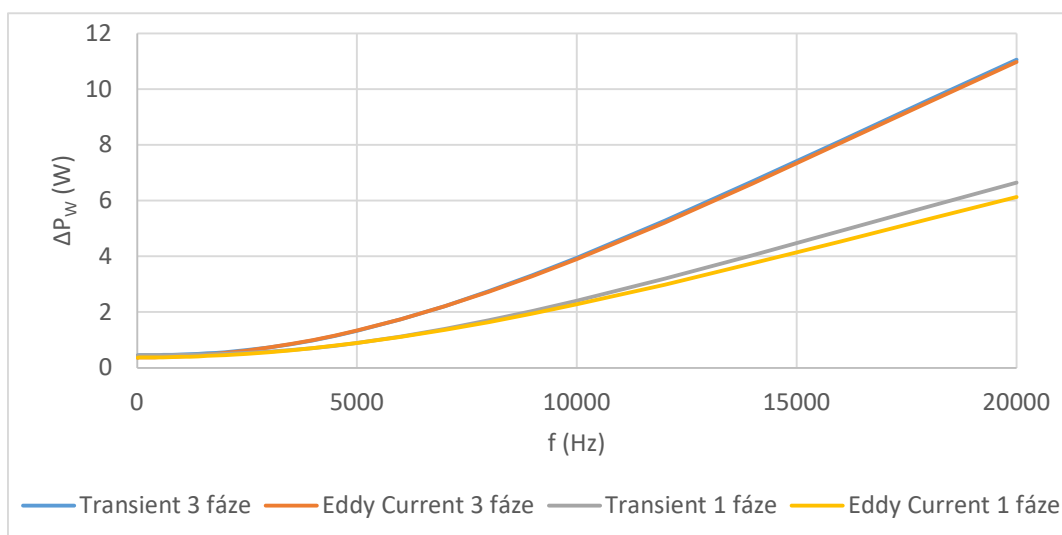
Pokles amplitudy magnetické indukce se projeví poklesem ztrát ve vinutí. Rozptylový tok uzavírající se drážkou naopak ztráty ve vinutí navýší a přispěje k nelineárnímu rozložení proudu po průřezu vodiče (viz Obr. 15). Ztráty ve vinutí třífázového modelu bez rotoru jsou při frekvenci 20 kHz třetinové ve srovnání se simulací úplného stroje. Ztráty ve vinutí jednofázového modelu jsou pětinnové oproti ztrátám v modelu se třemi fázemi a rotorem. Ve srovnání s třífázovým modelem jednofázový model vykazuje o 40 % nižší ztráty. Průběh ztrát ve vinutí je znázorněn v Obr. 17.



Obr. 17: Velikost ztrát ve vinutí testovaných modelů

Z Obr. 16 a Obr. 18 si lze povšimnout téměř totožných výsledků třífázové Transientní a Eddy Current simulace bez rotoru. Výsledky jednofázové Transientní a Eddy Current simulace se při vysokých frekvencích liší zhruba o 8 % ztrát ve vinutí a o 18 % ztrát v železe.

Veliký rozdíl činí také doba výpočtu jednotlivých simulací. Simulace s rotorem se počítá na použitému výpočetním serveru 4 hodiny. Transientní simulace bez rotoru trvají 2,5 hodiny a Eddy Current simulace 10 minut. Ostatní simulace jsou kvůli úspoře času simulovány Eddy Current simulacemi.



Obr. 18: Srovnání ztrát ve vinutí pro Transientní a Eddy Current simulace bez rotoru

## 2.4 Srovnání jednovrstvého a dvouvrstvého vinutí

Srovnání jednovrstvé a dvouvrstvé konfigurace je provedeno za účelem výběru vhodné konfigurace pro měření, která by zajistila vyšší přesnost měření. Konfigurace dosahující vyššího poměru ztrát ve vinutí ku ztrátám v železe je vybrána pro účely dalšího zkoumání. Vinutí modelů je v této kapitole již upraveno pro redukovanou variantu o 32 závitů umístěných do drážky statoru.

V rozmezí od 10 Hz do 3 kHz jsou ztráty ve vinutí obou zkoumaných konfigurací vyšší než ztráty v železe. S rostoucí frekvencí dochází k rychlejšímu růstu ztrát v železe než ztrát ve vinutí. Při frekvenci 20 kHz jsou již ztráty v železe obou zkoumaných variant dvakrát větší než ztráty ve vinutí. Z hlediska měření představuje problém vzájemná velikost obou ztrát. Ztráty v železe pro vysoké frekvence dosahují řádově velikosti v jednotkách kW. Oproti tomu ztráty ve vinutí dosáhnou u dvouvrstvého vinutí pouze nižších desítek W a u jednovrstvého vinutí nižších stovek W.

Při vyhodnocení dat z měření bude vždy přítomná chyba měření. Vzhledem k enormnímu rozdílu velikostí obou ztrát je však zapotřebí tuto chybu minimalizovat a vybrat variantu s výraznějšími ztrátami ve vinutí.

Model jednovrstvého vinutí dosahuje vyšších hodnot poměru ztrát ve vinutí ku ztrátám v železe při frekvencích přesahujících 3,5 kHz. Pro účely měření a vyhodnocení dat z měření bude tato konfigurace výhodnější. Všechny modely, které zkoumají vliv jednotlivých úprav vinutí jsou simulovány s jednovrstvým vinutím o 32 závitů.

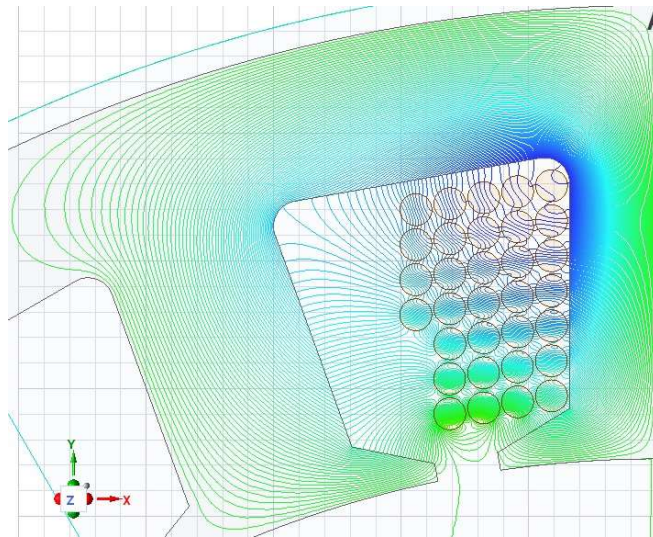
## 2.5 Ztráty jednotlivých závitů

Velikost ztrát ve vinutí je velkou měrou ovlivněna rozptylovým magnetickým tokem, který zasahuje do drážky stroje. Velikost rozptylového toku je nejvyšší v blízkosti otevření drážky a směrem ke dnu drážky rozptylový tok slábne. Rozložení rozptylového toku v drážce nelze odhadnout a je nutné jej nasimulovat. Výsledky kapitoly slouží k lepšímu porozumění později probíraných úprav vinutí.

Použitý model se od výchozí šablony odlišuje nastavením vinutí. Každému závitů byl v simulaci nastaven externí zdroj napájení. Následně byl vytvořen externí obvod obsahující proudový zdroj, který poskytuje sinusové napájení efektivní hodnotou proudu 3,8 A. Ke zdroji jsou sériově připojeny veškeré závity modelovaného vinutí. Vytvořené zapojení je nutné vyexportovat a následně přiřadit v Excitations příslušnému modelu. Zapojení externího obvodu je uvedeno v Obr. 19.



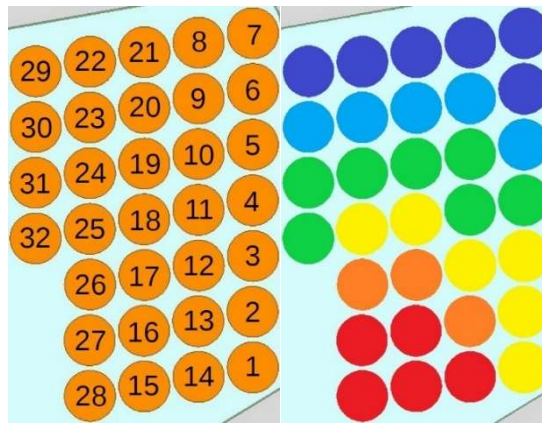
Obr. 19: Externí obvod simulace ztrát jednotlivých závitů



Obr. 20: Rozložení magnetického toku v drážce při frekvenci 20 kHz

Z Obr. 20 je patrné, že nejvyšší koncentrace magnetického toku se vyskytuje v závitech v blízkosti otevření drážky, přes které se následně uzavírá do sousedícího zubu. S rostoucí vzdáleností od otevření skutečně dochází k poklesu koncentrace magnetického toku ve vodičích, a tím i k poklesu ztrát. Zároveň dochází k vyšší koncentraci magnetického toku ve vodičích nacházejících se blíže ke středu drážky.

Rozložení ztrát koresponduje s rozložením magnetického toku znázorněného na Obr. 20. Nejvyšší ztráty se vyskytují v závitech s vysokou koncentrací magnetického toku. S klesající koncentrací toku dochází k poklesu ztrát. Pro účely snazšího vyhodnocení a prezentování výsledků byly jednotlivé závity očíslovány.



Obr. 21: Označení závitů čísly (vlevo), Ztráty jednotlivých závitů (vpravo)

Nejmenší ztráty ze všech závitů generuje vodič označený č. 7. Ztráty závitů č. 7 byly následně zvoleny jako referenční hodnota pro srovnání se ztrátami ostatních závitů. Obr. 21 vpravo znázorňuje mapu rozložení ztrát ve vinutí. Závity označené červenou barvou generují ztráty více než 100x větší než závit č. 7. Závity označené oranžově vykazují ztráty v rozmezí 50x až 100x větší než závit č. 7. Žluté závity 30x až 50x, zelené 15x až 30x, světle modré 5x až 15x a tmavě modré méně než 5x větší ztráty než závit č. 7.

Vliv rozptylového toku v oblasti otevření drážky lze omezit použitím uzavřených drážek, úpravou otevření drážky či použitím magnetických klínů. Tyto úpravy nejsou v práci uvažovány, neboť způsobují lokální přesycení magnetického obvodu nebo vyžadují úpravu magnetického obvodu.

## 2.6 Odsunutí vinutí od otevření drážky

Odsunutí vinutí je jednou ze zkoumaných úprav diskutovaných v této práci. Cílem úpravy je omezit vliv rozptylového toku v oblasti otevření drážky, kde přispívá nejvíce ke vzniku ztrát ve vinutí. Vinutí je vytvořeno úmyslně tak, aby bylo maximalizováno využití drážky v oblasti dna drážky, a naopak prostor v blízkosti otevření zůstal co nejméně zaplněn.

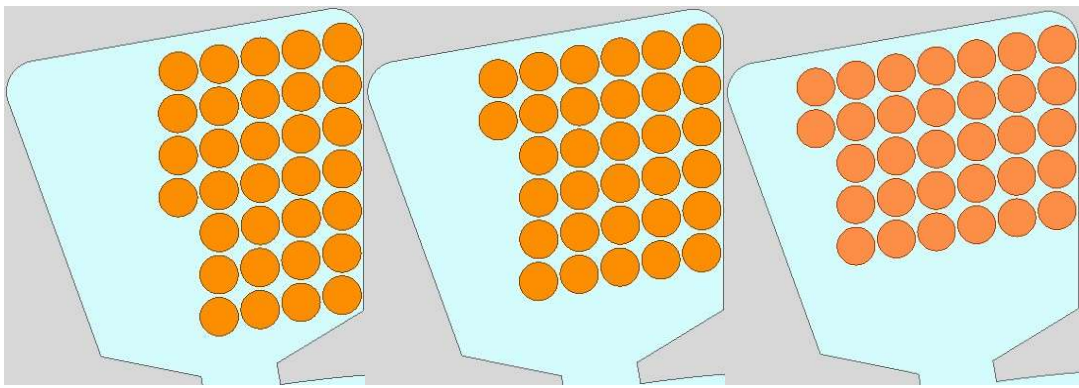
Odsunutí vinutí je nutné simulovat, jelikož vliv úpravy nelze předem odhadnout. Úprava vinutí způsobí změnu rozložení vodičů v drážce, které má také vliv na velikost ztrát. Nevhodným rozložením vodičů může dojít k nechtěnému navýšení ztrát ve vinutí.

Z hlediska výroby elektrického stroje je snaha dosáhnout co nejvyššího plnění drážky za účelem zmenšení rozměrů daného stroje. Odsunutí vinutí představuje pro tuto snahu problém. Aby bylo docíleno odsunutí vinutí, je zapotřebí navýšit rozměry drážky či zmenšit průměr použitého vodiče pro navíjení cívek. Jelikož je pro výrobu vzorků využit jeden konkrétní vzorek magnetického obvodu nemohu měnit rozměry drážky.

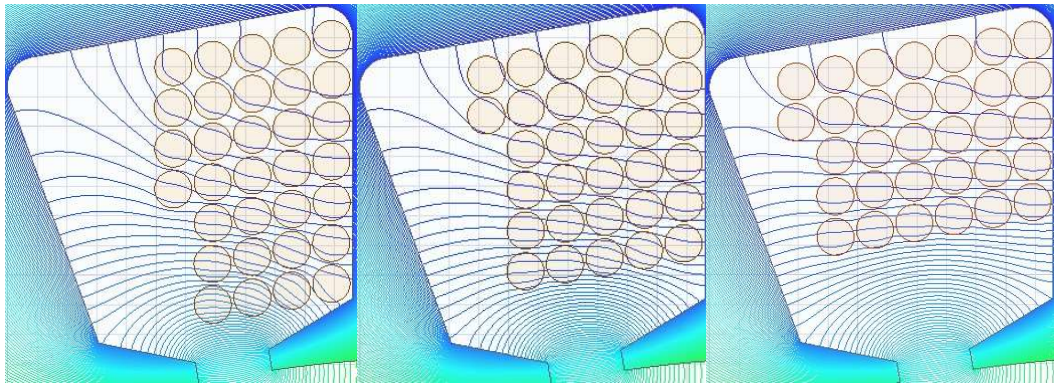


Diskutovaná úprava nebude realizována pro účely měření kvůli obtížně predikovaným výsledkům celé úpravy. Vytvoření vzorku z vodiče o průměru 1,25 mm není realizovatelné, jelikož při navíjení vodiče daného průměru muselo dojít k redukci závitů cívky. Pokud by měl daný vzorek vzniknout, muselo by dojít ke snížení průměru vodiče a tím i ke snížení plnění drážky.

Model výchozí cívky o 32 závitů z vodiče o průměru 1,25 mm byl upraven změnou rozložení závitů. Závitů vinutí tvořící vrstvu nejbližší k otevření drážky byly v modelu přesunuty do vrstev umístěných blíže ke dnu drážky. Odsunutí bylo následně provedeno i pro druhou vrstvu vinutí z původního modelu. Provedené úpravy jsou zobrazeny na Obr. 22.

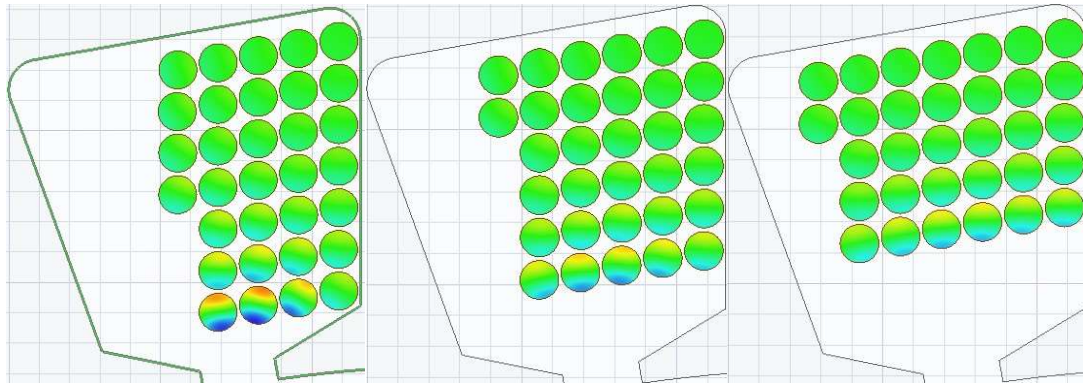


Obr. 22: Zkoumané varianty vinutí. Výchozí konfigurace (vlevo), vinutí po odsunutí jedné vrstvy (uprostřed), vinutí po odsunutí dvou vrstev (vpravo).



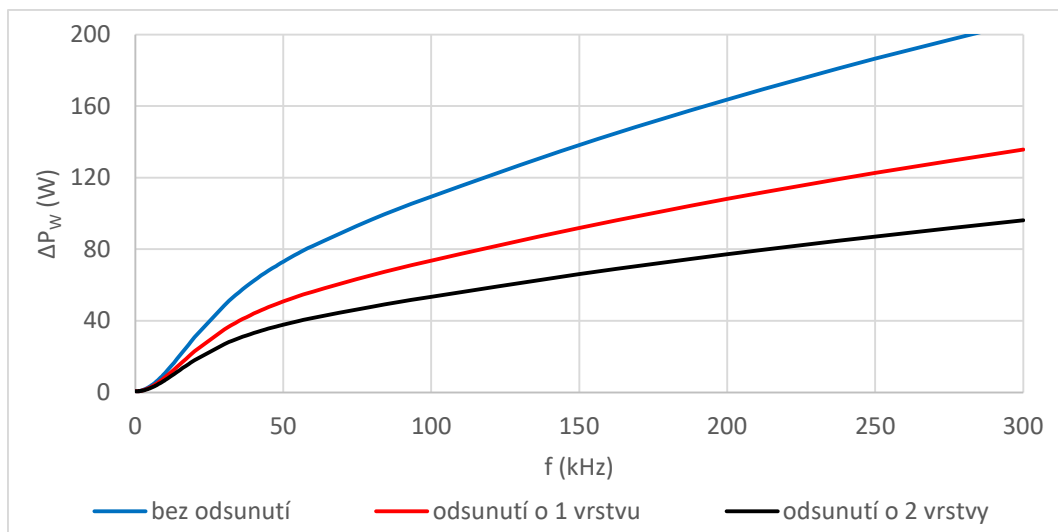
Obr. 23: Rozložení magnetického toku v simulacích zabývajících se odsunutím vinutí

Z Obr. 23 je patrné, že vinutí je zasahováno magnetickým tokem méně již při odsunutí vinutí o jednu vrstvu vinutí. Zároveň se úprava pozitivně projeví na rozložení proudu ve vodičích. Omezení maxima proudové hustoty zobrazuje Obr. 24.



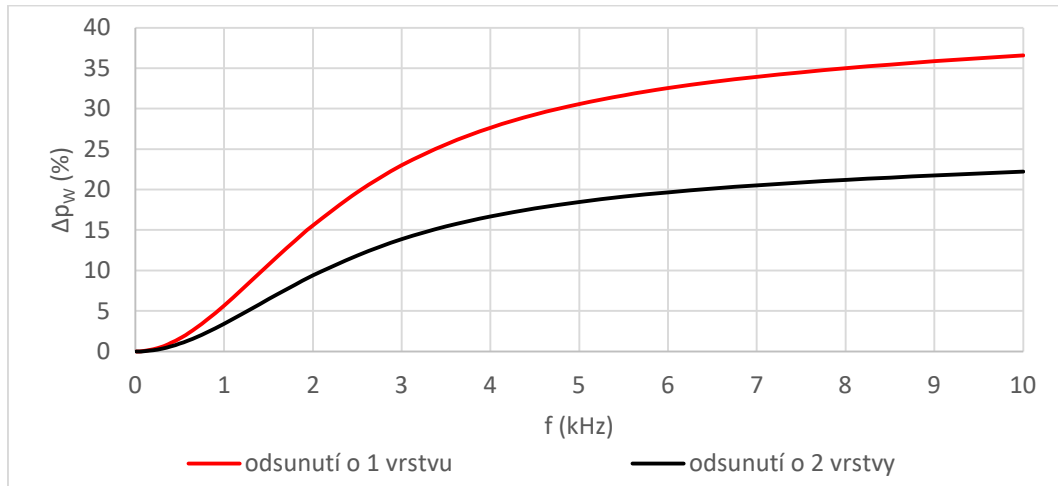
Obr. 24: Rozložení proudu v závitech cívek při frekvenci 20 kHz

Cívka, u které není odsunutí provedeno, vykazuje maximální hodnotu proudové hustoty ve vinutí  $73,39 \text{ A/mm}^2$ . Cívka s odsunutými závity o jednu vrstvu vinutí dosahuje maximální hustoty proudu  $54,48 \text{ A/mm}^2$ . Maximální proudové hustoty  $46,47 \text{ A/mm}^2$  dosahuje cívka s odsunutými dvěma vrstvami. Přesto, že jsou tyto hodnoty nereálné, je ze simulace patrné, že došlo k linearizaci proudu v upravených cívkách. Vinutí voleného průřezu napájené efektivní hodnotou proudu o velikosti  $3,8 \text{ A}$  by mělo dosahovat proudové hustoty okolo  $3 \text{ A/mm}^2$ . Ztráty ve vinutí provedených úprav jsou vykresleny v Obr. 25.



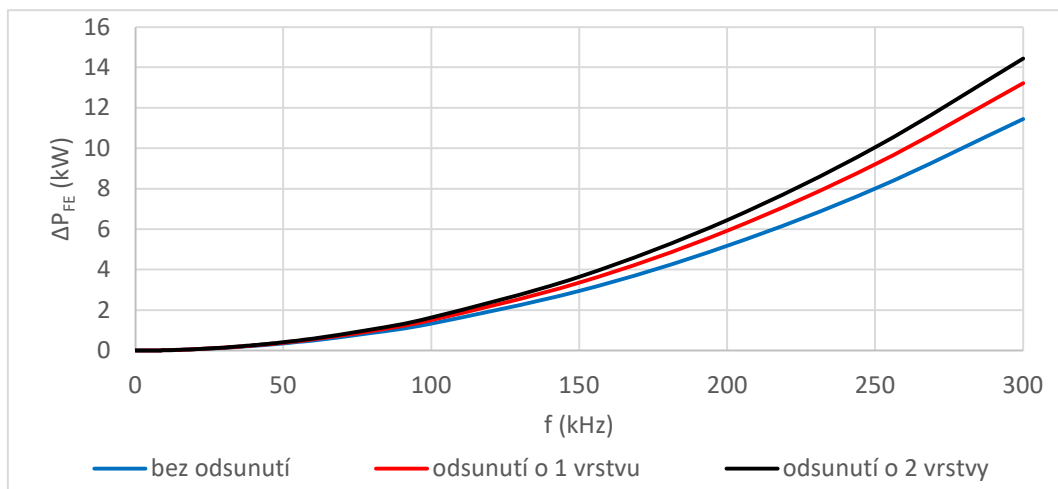
Obr. 25: Velikost ztrát ve vinutí zkoumaných konfigurací cívek

Zkoumané úpravy omezují ztráty ve vinutí v celém zkoumaném frekvenčním pásmu. Při frekvenci 1 kHz obě úpravy omezily ztráty přibližně o 5 %. S rostoucí frekvencí efekt omezení ztrát roste. Maximální omezení nastává při frekvenci 300 kHz, při které cívka s jednou odsunutou vrstvou omezuje ztráty o 34 % a cívka se dvěma odsunutými vrstvami o 53 %. Efekt redukce ztrát je zobrazen na Obr. 26.



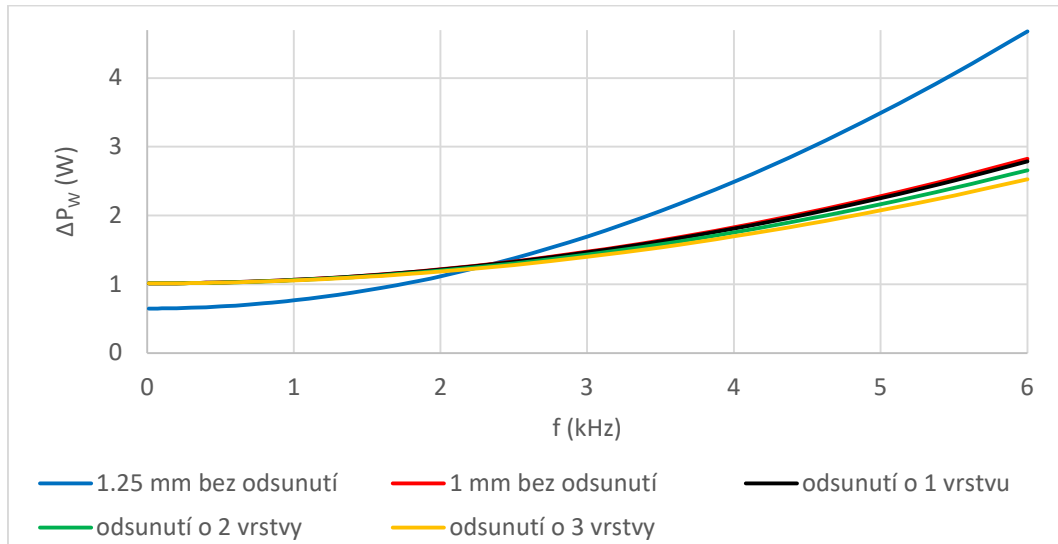
Obr. 26: Redukce ztrát ve vinutí v %

Ztráty v železe byly úpravami naopak navýšeny v celém rozsahu zkoumaných frekvencí. Do frekvence 10 kHz je navýšení ztrát téměř konstantní. V případě cívky odsunutě o jednu vrstvu dojde k nárůstu ztrát o 3,5 %, v případě cívky se závitů odsunutými o dvě vrstvy ztráty narostou o 7 %. Pro frekvence přesahující 10 kHz dojde k výraznějšímu nárůstu ztrát v železe. Maximální navýšení ztrát cívky s jednou odsunutou vrstvou je 15,4 % při 300 kHz. Vinutí se dvěma odsunutými vrstvami při stejné frekvenci navýší ztráty v železe o 26 %. Průběh ztrát v železe je uveden v Obr. 27.



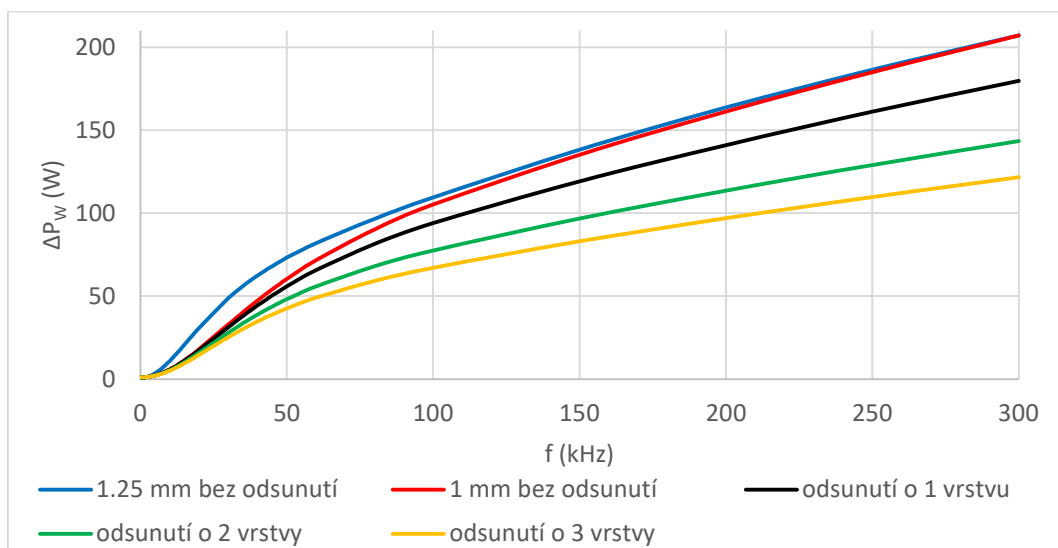
Obr. 27: Ztráty v železe zkoumaných konfigurací cívek

Simulace byly provedeny také pro vodič o průměru 1 mm. Rozložení vodičů v simulacích s tenčím vodičem je obdobné jako na Obr. 22. Simulace byla provedena pro cívku bez odsunutí a cívky s odsunutím o jednu, dvě a tři vrstvy vinutí. Použitím vodiče menšího průměru dochází k nárůstu stejnosměrných ztrát ve vinutí až o 56 %. Průběh ztrát ve vinutí je uveden v Obr. 28 a Obr. 29.



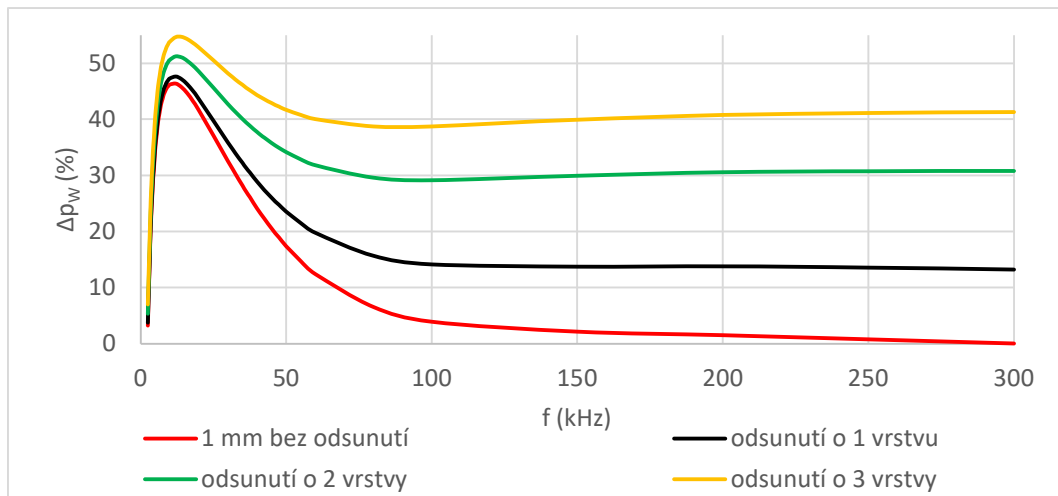
Obr. 28: Ztráty ve vinutí v konfiguracích s vodičem o průměru 1 mm do frekvence 6 kHz

Všechny cívky, u kterých bylo provedeno odsunutí omezují ztráty ve vinutí ve frekvenčním pásmu 2,5 kHz až 300 kHz. Cívka tvořená vodičem o průměru 1 mm bez odsunutých závitů při frekvenci 300 kHz dosahuje stejně velkých ztrát ve vinutí jako výchozí konfigurace s vodičem o průměru 1,25 mm.

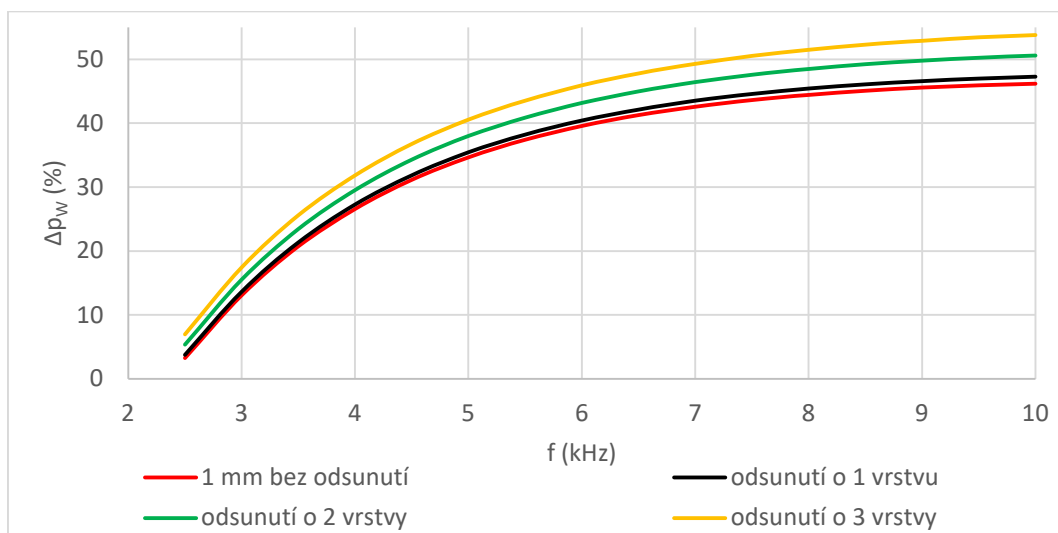


Obr. 29: Ztráty ve vinutí v konfiguracích s vodičem o průměru 1 mm v celém frekvenčním pásmu

Efekt omezení ztrát uvedený v Obr. 30 a Obr. 31 je nejvyšší v rozmezí frekvencí od 9 kHz do 14 kHz. Při frekvencích přesahujících toto pásmo dochází k poklesu redukce ztrát ve vinutí. Maximální redukce ztrát se pohybuje v rozmezí od 45 % do 55 %.



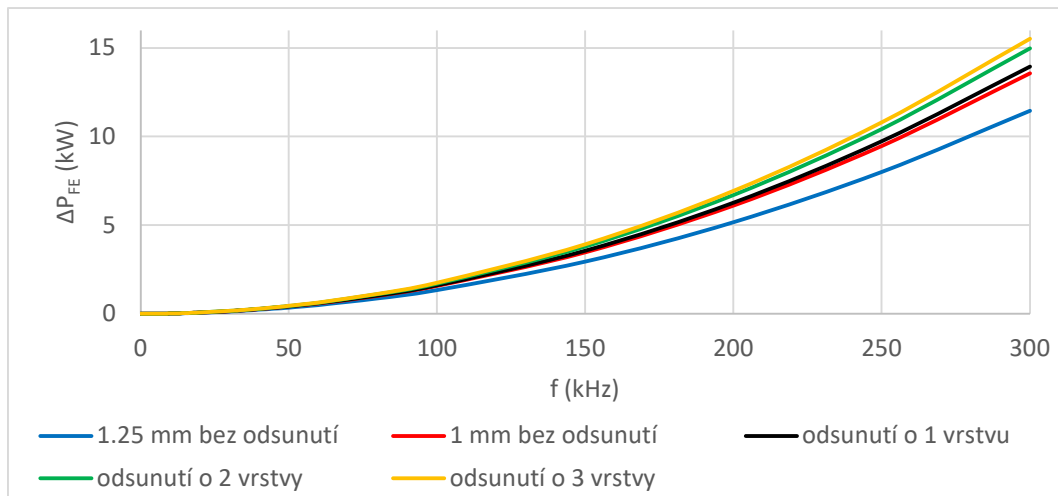
Obr. 30: Redukce ztrát (%) vinutí navinutého z tenčího vodiče s provedeným odsunutím závitů



Obr. 31: Redukce ztrát ve vinutí do frekvence 10 kHz

Ztráty v železe vykazují totožné chování jako v případě odsunutí závitů o průměru 1,25 mm. Cívka bez odsunutých závitů z vodiče tlustého 1 mm navýší ztráty v železe o 5 % při frekvenci 10 Hz. Odsunutím o jednu vrstvu ztráty narostou o 6 %. O 9 % narostou v případě dvou odsunutých vrstev a o 11 % v případě tří odsunutých vrstev při frekvenci 10 Hz. Do frekvence 6 kHz je navýšení ztrát v železe téměř konstantní pro všechny konfigurace. Pro frekvence v rozmezí od 6 kHz do 60 kHz dochází k výraznějšímu nárůstu ztrát v železe. Při frekvencích přesahujících 60 kHz dochází k ustálení efektu. Průběh ztrát v železe znázorňuje Obr. 32 na následující straně.

Navýšení ztrát se ustálí na hodnotě 18,5 % v případě cívky bez odsunutí, 22 % v případě odsunutí jedné vrstvy závitů, 31 % v případě odsunutí dvou vrstev závitů a 35,5 % při odsunutí tří vrstev závitů.



Obr. 32: Ztráty v železe konfigurací s vodičem o průměru 1 mm

## 2.7 Změna materiálu vinutí

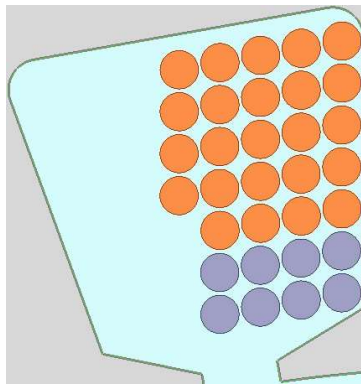
Změna materiálu vinutí je provedena za účelem omezení vířivých proudů uzavírajících se v závitěch. Úprava je inspirována způsobem omezení vířivých proudů v magnetickém plechu. Magnetické plechy se legují křemíkem kvůli úmyslnému navýšení rezistivity materiálu. Plechy díky vyšší rezistivitě sníží velikost amplitudy uzavírajících se vířivých proudů a redukují generované ztráty.

V případě vinutí je volen obdobný postup. Vinutí je úmyslně vytvořeno z materiálu s vyšší rezistivitou za účelem omezení ztrát ve vinutí. Z dané úpravy vyplývá i její zásadní nevýhoda. Úprava nebude účinná v celém rozsahu provozních frekvencí stroje. Materiál s vyšší rezistivitou bude generovat vyšší ztráty ve vinutí při nízkých frekvencích než materiál s vodivostí nižší. S rostoucí frekvencí nastane stav, kdy se ztráty obou cívek vyrovnají a následně začnou převládat ztráty ve vinutí z materiálu s nižší rezistivitou. Pro vhodnou aplikaci zvoleného přístupu je nutné brát tuto nevýhodu na vědomí. Aplikace bude vhodná pro stroje, které budou po výraznou část svého života provozovány při frekvencích přesahujících uvedený průsečík křivek.

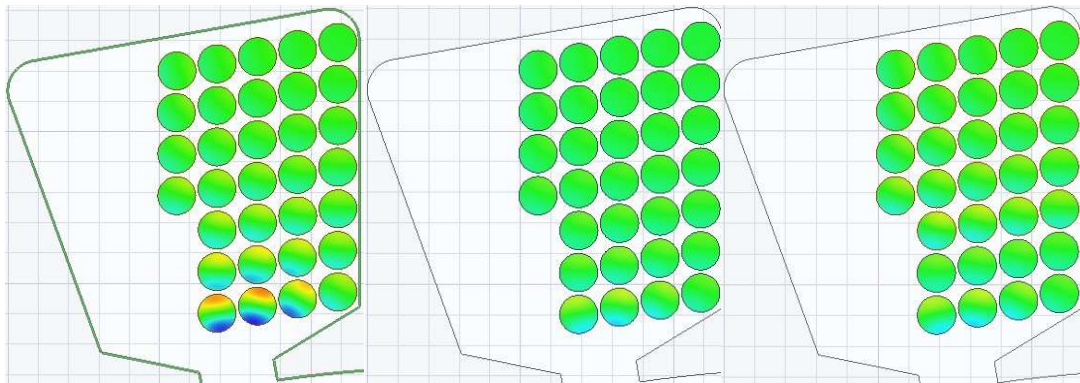
Výchozí cívka je v simulaci vytvořena z mědi. Materiál upravené cívky v simulaci je z hliníku. Hliník je v elektrotechnice dlouho používaným materiálem. Pro výrobu vinutí se také používá, byť v menší míře než měď. Hliník má nižší hustotu i cenu než měď, zároveň má vyšší měrnou tepelnou kapacitu. Hliník je dostupnějším materiálem se snadnou recyklovatelností, ale jeho velkou nevýhodou jsou jeho mechanické vlastnosti.

Použití hliníku pro vinutí je inspirováno provedenou rešerší, kdy prostřednictvím hliníkových cívek či cívek hybridních bylo dosaženo výrazného efektu redukce ztrát. [2, 5, 6, 8, 18] Hybridní cívkou je myšlena cívka se závitů z různých materiálů či ze závitů s rozdílnými počty paralelních vodičů v jednotlivých vrstvách vinutí.

Navíc byla vytvořena hybridní cívka, která má první dvě vrstvy vinutí vytvořené z hliníku a zbytek cívky je tvořen měděnými závitů. Konfigurace je uvedena na Obr. 33. Tato konfigurace opět cílí na omezení vlivu rozptylového toku, který v blízkosti otevření drážky vytváří nejvyšší ztráty. Konfigurace cívky je čistě pokusná a nebere ohled na realizaci a s ní spojené obtíže.



Obr. 33: Cívka s hliníkovými závitů (šedé) a měděnými závitů (oranžové)



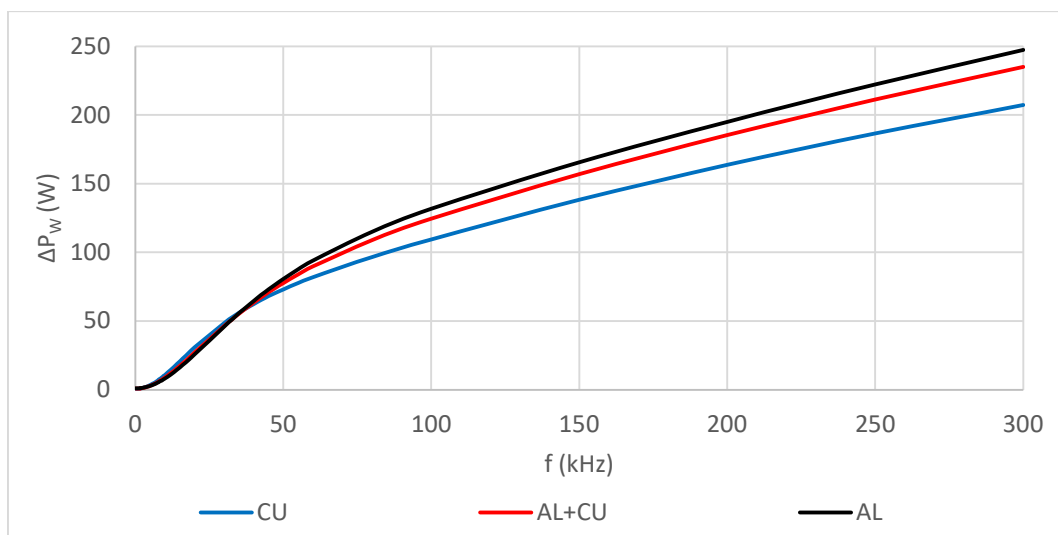
Obr. 34: Rozložení proudu ve vodičích při frekvenci 20 kHz. Cívka s měděnými závitů (vlevo), cívka s hliníkovými závitů (uprostřed) a cívka s hybridními závitů (vpravo)

Měděná cívka dosahuje nejvyšší nelinearity rozložení proudu. Nejvyšší proudová hustota v simulaci je  $73,39 \text{ A/mm}^2$ . Změna materiálu přispěla k rovnoměrnějšímu rozložení proudu v obou zkoumaných případech. Maximální proudová hustota hliníkového vinutí je  $41,07 \text{ A/mm}^2$  a hybridního vinutí  $41,06 \text{ A/mm}^2$ .

Z Obr. 34 je patrné, že v případě hliníkového a kombinovaného vinutí dochází k rozdílnému rozložení proudu. Hliníkové vinutí vykazuje nelineární rozložení proudu zejména v prvních dvou vrstvách vinutí blízkých otevření drážky. V případě kombinovaného vinutí dochází i k nelineárnímu rozložení proudu v třetí a čtvrté vrstvě vinutí.

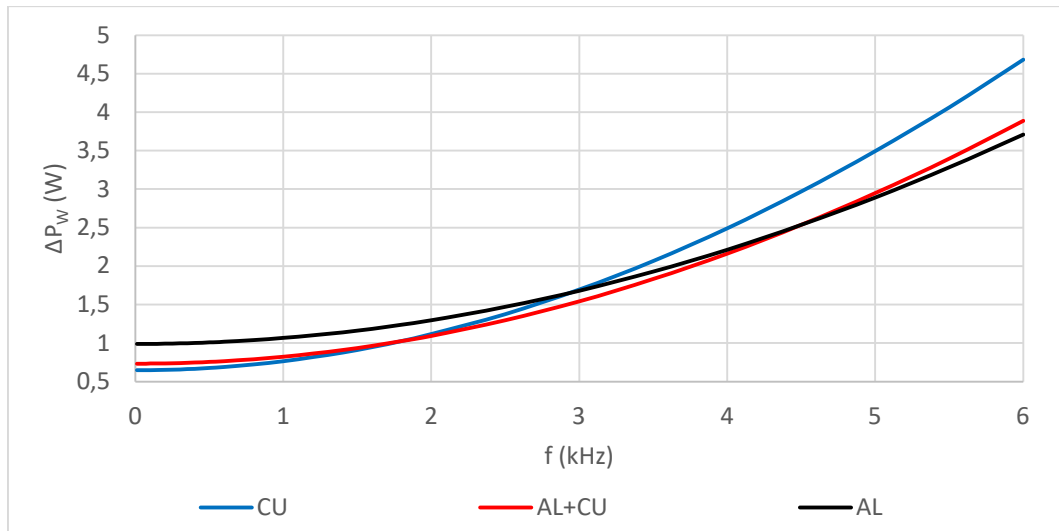
Provedené úpravy téměř nemění velikost ztrát v železe, což je velkou měrou způsobeno stejnými pozicemi závitů v simulaci. Maximální navýšení ztrát v železe nastalo v případě hliníkového vinutí o 5,3 % a v případě hybridní cívky o 3,5 %. Navýšení ztrát v železe o 1 % nastalo v případě hliníkového vinutí až při frekvenci 8 kHz a v případě hybridní cívky až při frekvenci 12 kHz. Při frekvencích vyšších než 40 kHz začalo navýšení ztrát v železe pozvolna klesat. V případě frekvence 300 kHz bylo navýšení ztrát v železe obou konfigurací opět okolo 1 %.

Celkový průběh ztrát ve vinutí je vykreslen v Obr. 35. Průběh ztrát ve vinutí je pro lepší zobrazení výsledků také uveden v užším rozsahu frekvencí (Obr. 36 a Obr. 37). Provedené úpravy neomezují ztráty ve vinutí v celém rozsahu zkoumaných frekvencí. Ze všech testovaných úprav vinutí došlo k omezení ztrát v nejmenším rozsahu zkoumaných frekvencí. Hliníkové vinutí omezuje ztráty od 3 kHz do 35 kHz. Hybridní cívka omezuje ztráty v rozsahu od 1,8 kHz do přibližně 36 kHz.

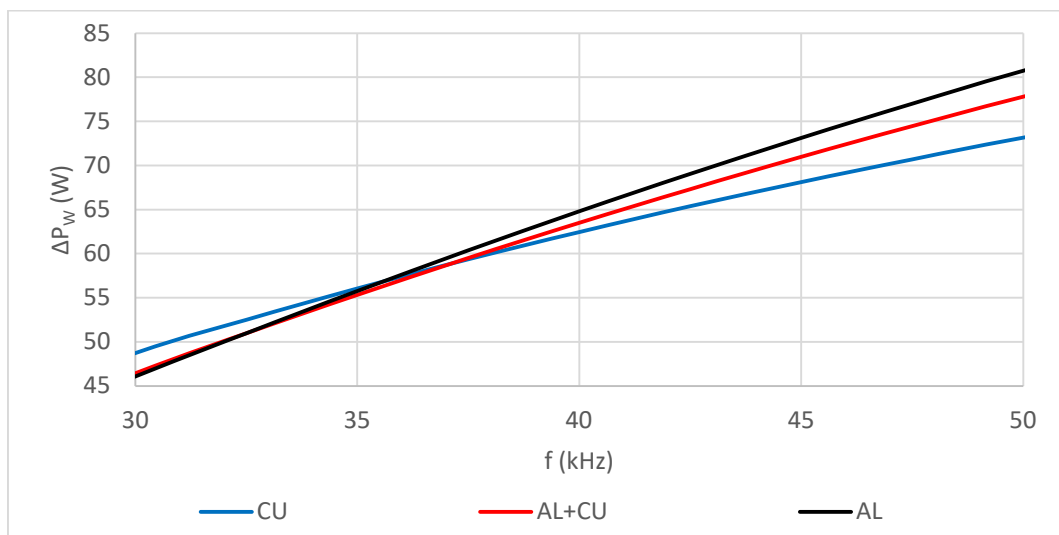


Obr. 35: Průběh ztrát ve vinutí cívek vyrobených z rozdílného materiálu





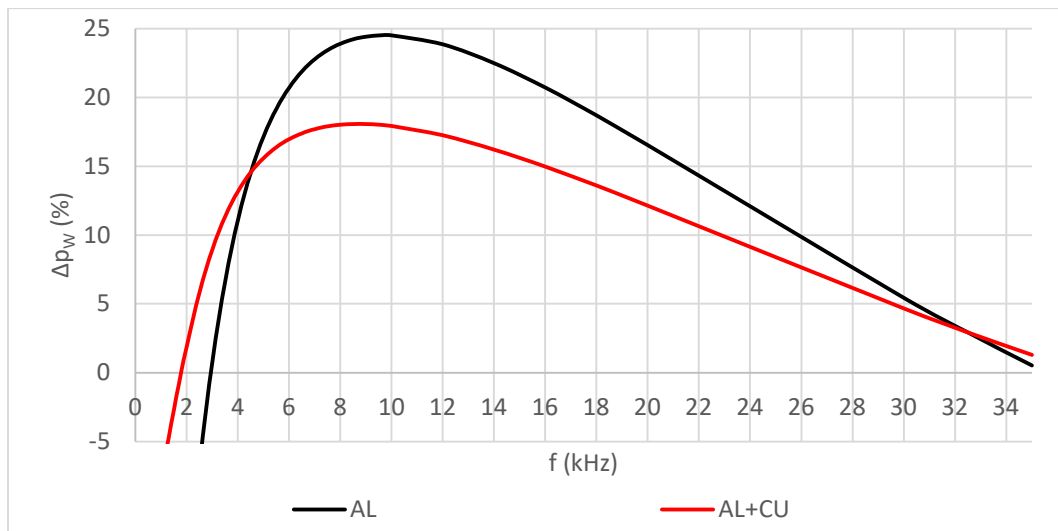
Obr. 36: Průběh ztrát ve vinutí pro frekvence nižší než 6 kHz



Obr. 37: Detail průběhu ztrát ve vinutí cívek rozdílných materiálů

Při frekvenci 10 Hz navýšilo hliníkové vinutí ztráty o 52,6 %. Hybridní cívka při stejné frekvenci navýšila ztráty ve vinutí o 13,1 %. V oblasti vysokých frekvencí došlo k maximálnímu navýšení ztrát ve vinutí o 20,3 % v případě hliníkového vinutí a o 13,7 % v případě hybridního vinutí.

Hliníkové závity dosáhli maximální redukce ztrát při 9,5 kHz. Při 9,5 kHz redukuje vinutí ztráty o 24,5 %. Hybridní cívka dosáhla až 18 % redukce ztrát při frekvenci 8,5 kHz. Průběh redukce ztrát hliníkového a hybridního vinutí je uveden v Obr. 38.



Obr. 38: Redukce ztrát ve vinutí cívek s hliníkovými vodiči

Konfigurace cívek byly porovnány při frekvenci 150 kHz, kdy cívky s hliníkovými závitmi vykazují zhruba o 20 % nižší hodnoty maxima proudové hustoty než cívka s měděnými závitmi. Přesto při frekvenci 150 kHz již upravené cívky ztráty neredukují. Ztráta efektu redukce ztrát může být způsobena vyšší rezistivitou hliníku, která pravděpodobně zastíní vliv parazitních jevů způsobujících navýšení ztrát.

Hliníkové vinutí se podle výsledků simulací nemusí zdát příliš použitelné pro případnou aplikaci. Mějme na paměti, že zde uvedený přístup je aplikován na vodiče malého průřezu. Pokud bude provedena stejná simulace na vinutí s vodiči většího průřezu, dojde k poklesu frekvence, od které vinutí začne redukovat ztráty. [2] Stejně se bude chovat i hybridní cívka. [8] Efekt omezení ztrát a frekvenční rozsah redukce ztrát se v případě hybridní cívky bude měnit v závislosti na množství použitých hliníkových závitů.

Pokus o vytvoření hybridní cívky může působit jako špatný nápad s velkým množstvím technických problémů na výrobu vinutí. Nelze však popřít nespornou výhodu dané úpravy, kdy dojde k redukci ztrát dříve než v případě plně hliníkové cívky a zároveň k podobně velké redukci ztrát ve vinutí. Zároveň dochází u hybridní cívky k výrazně nižšímu nárůstu ztrát ve vinutí v oblasti nízkých frekvencí.

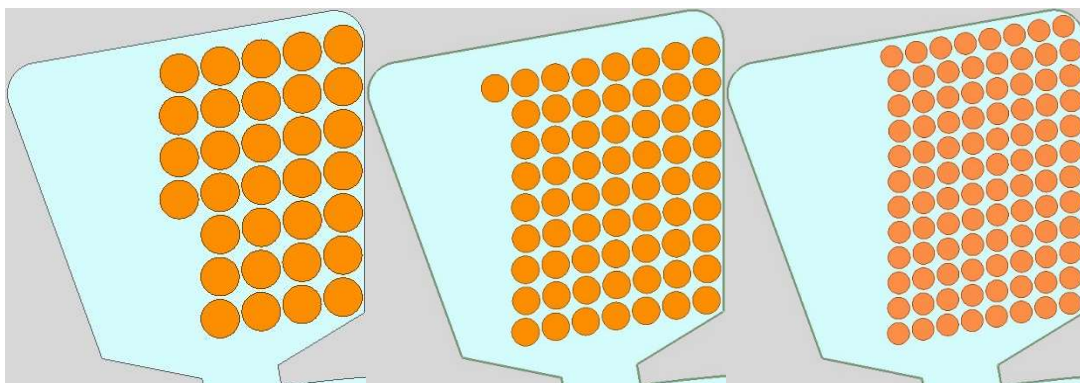
Vzorek hliníkové cívky bohužel nebude navinut k měření. Ve své práci uvažuji maximální průměr vodiče 1,25 mm. Hliníkové vodiče pro vinutí jsou skladově dostupné od průměru 1,6 mm. Vodiče menšího průměru lze sehnat pouze pod podmínkou odebrání alespoň 30 kg materiálu. Uvažovanou alternativou bylo použití hliníkového šperkařského drátu s eloxovaným povrchem. Eloxování je elektrochemický proces, při kterém je vytvořena povrchová vrstva oxidu hlinitého o tloušťce 5 až 25  $\mu\text{m}$ . [16] Oxid hlinitý je dobrým izolačním materiálem díky své nízké vodivosti. Při měření odporu izolace vzorku dodaného drátu však docházelo k porušení této povrchové vrstvy. S ohledem na tento fakt a na mechanické vlastnosti hliníku jsem se rozhodl danou cívku nenavíjet.

## 2.8 Změna počtu paralelních vodičů

Změnou počtu paralelních vodičů lze omezit vliv skin efektu působícího na vodiče. Hloubka vniku se stanoví vzorcem

$$d_h = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.7)$$

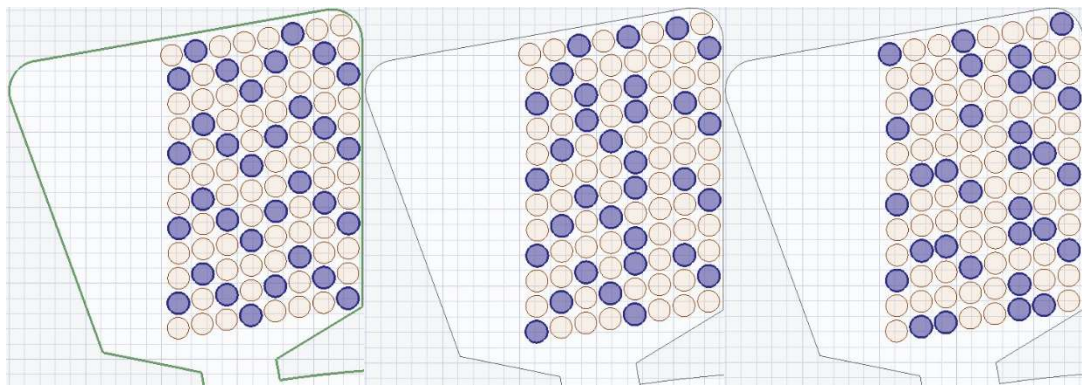
V simulacích uvažuji největší průměr vodiče 1,25 mm. Při frekvencích vyšších než 10 kHz klesne hloubka vniku pod hodnotu 0,625 mm a dojde ke vzniku skin efektu v použitém vodiči. Použitím vodičů menšího průměru dojde ke vzniku skin efektu při výrazně vyšších frekvencích. Simulace provádím pro konfiguraci cívek se 2 paralelními vodiči o průměru 0,9 mm a se 3 paralelními vodiči o průměru 0,71 mm. V případě vodiče 0,9 mm dojde ke vzniku skin efektu při frekvencích vyšších než 20 kHz. V případě vodiče 0,71 mm vzniká skin efekt až pro frekvence přesahující 32,5 kHz. Vytvořené modely jsou uvedeny na Obr. 39.



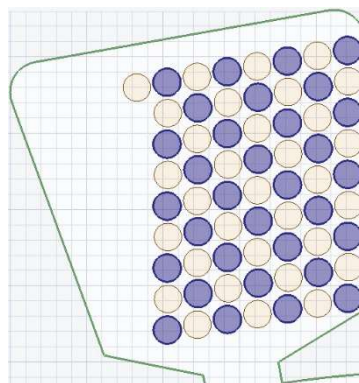
Obr. 39: Modely vinutí s rozdílným počtem paralelních vodičů. Vinutí s  $n_p = 1$  (vlevo),  $n_p = 2$  (uprostřed),  $n_p = 3$  (vpravo)

Dělení závitu do většího množství paralelních vodičů způsobí vznik cirkulačních proudů, které je možné omezit transpozicí vodičů. Transpozicí vodičů je možné omezit i vliv rozptylového toku. Jelikož jsou simulace vytvořeny ve 2D nemohu nasimulovat transpozici paralelních vodičů. Přesto je pro případnou aplikaci transpozice paralelních vodičů důležitou úpravou, která umožní dodatečnou redukci ztrát ve vinutí.

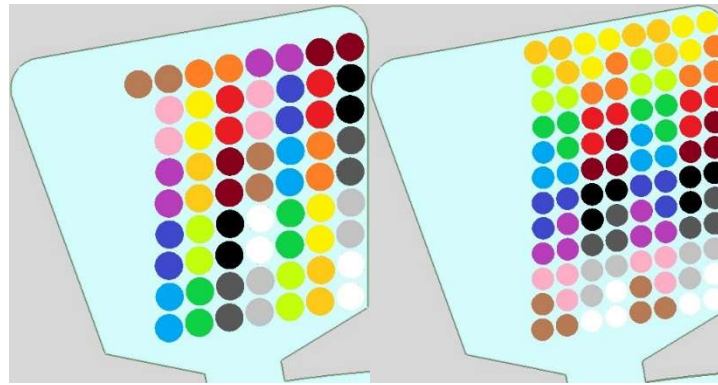
Simulace paralelních vodičů se od výchozí šablony modelu liší v nastavení vinutí. Veškeré objekty tvořící vinutí představují jeden fyzicky umístěný vodič do drážky. Vinutí s jedním paralelním vodičem jsou v simulaci přiřazeny veškeré vodiče. Pro případ více paralelních vodičů je cívka rozdělena do několika vinutí, jejichž počet odpovídá počtu paralelních vodičů. Vytvořeným vinutím jsou následně přiřazeny dráty příslušného paralelního vodiče (viz Obr. 40 a Obr. 41). Například v modelu, kde je  $n_p = 3$  jsou vytvořeny tři rozdílné cívky. Závity cívky 1 jsou vytvořeny pomocí závitů prvního paralelního vodiče. Výsledné tvary závitů jsou uvedeny na Obr. 42.



Obr. 40: Závity přiřazené jednotlivým vinutím v modelu s  $n_p = 3$ . Vinutí č. 1 tvořené závity 1. paralelním vodičem (vlevo), vinutí č.2 tvořené závity 2. paralelním vodičem (uprostřed), vinutí č.3 tvořené závity 3. paralelním vodičem (vpravo)

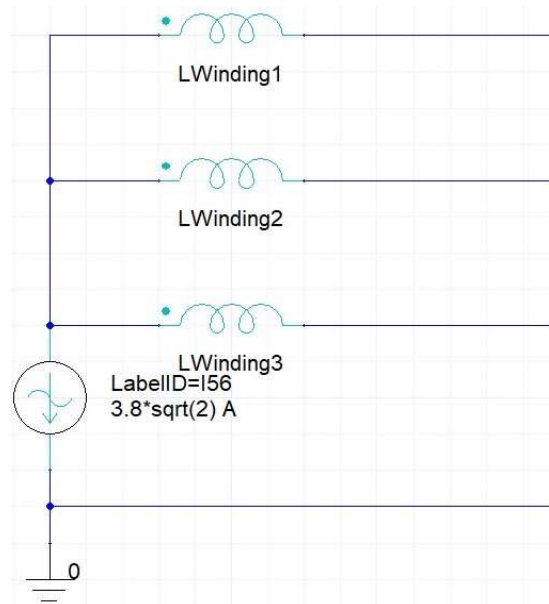


Obr. 41: Závity vinutí č.1 v simulaci s  $n_p = 2$



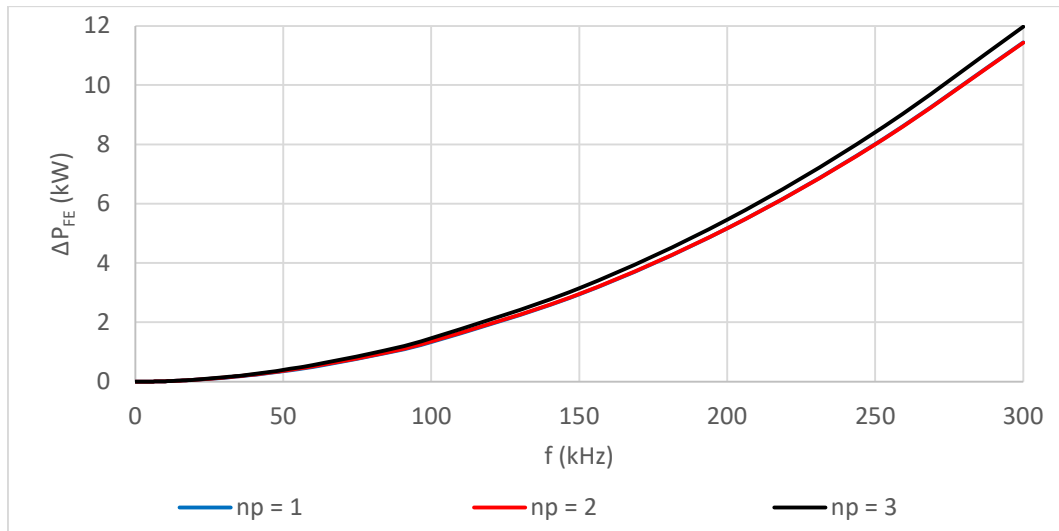
Obr. 42: Tvar závitů v simulacích se dvěma a třemi paralelními vodiči

Vinutí jsou napájena z externího zdroje. Externí obvod je tvořen zdrojem sinusového proudu a příslušným počtem vytvořených vinutí. Vinutí jsou ke zdroji připojena paralelně. Externí obvod například z Obr. 43 je potřeba importovat do příslušných simulací.



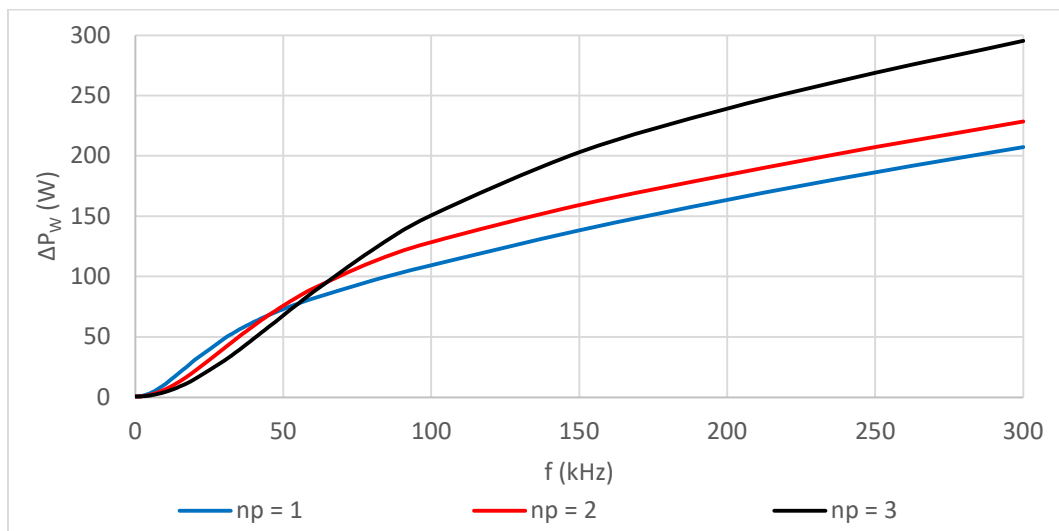
Obr. 43: Příklad externího obvodu importovaného do simulace se třemi paralelními vodiči

Modely v této podkapitole využívají podobné rozložení vodičů jako výchozí simulace. Díky tomu nedošlo k výraznému nárůstu ztrát v železe, což zobrazuje Obr. 44 na následující straně. Model dvou paralelních vodičů redukuje ztráty v železe maximálně o 2,7 %. Od 14 kHz do 200 kHz konfigurace s  $n_p = 2$  navýšila ztráty v železe. Maximální přírůstek ztrát 4,2 % nastal při 40 kHz. Model tří paralelních vodičů omezuje ztráty v železe do frekvence 6 kHz. Maximální omezení ztrát dosáhlo velikosti 1 %. Simulace s  $n_p = 3$  dosáhla maximálního přírůstu ztrát v železe 12,2 % při frekvenci 55 kHz.

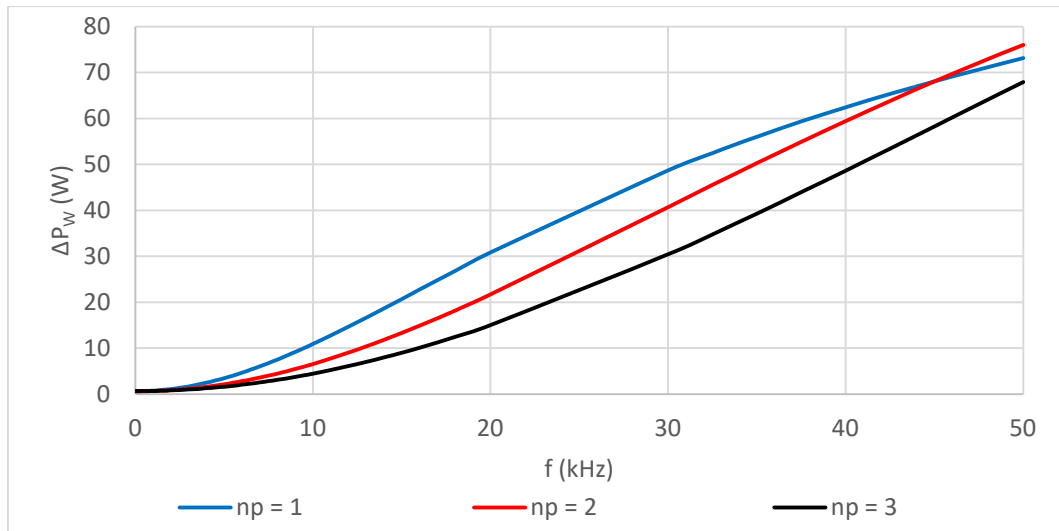


Obr. 44: Průběh ztrát v železe simulací s rozdílným počtem paralelních vodičů

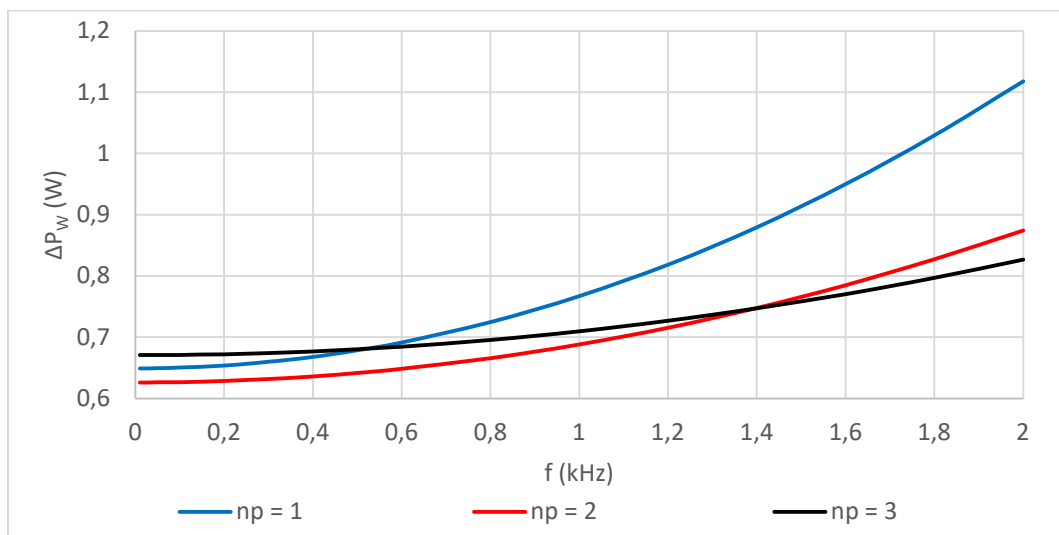
Simulované konfigurace neomezují ztráty ve vinutí v celém rozsahu frekvencí. Simulace s  $n_p = 2$  omezuje ztráty do 45 kHz. Simulace s  $n_p = 3$  omezuje ztráty od 500 Hz do 55 kHz. Použitím tří paralelních vodičů dojde k výraznějšímu omezení ztrát než v případě cívky s  $n_p = 2$ . Průběhy ztrát jsou zobrazeny Obr. 45 Obr. 46 a Obr. 47.



Obr. 45: Průběh ztrát ve vinutí simulací s rozdílným počtem paralelních vodičů



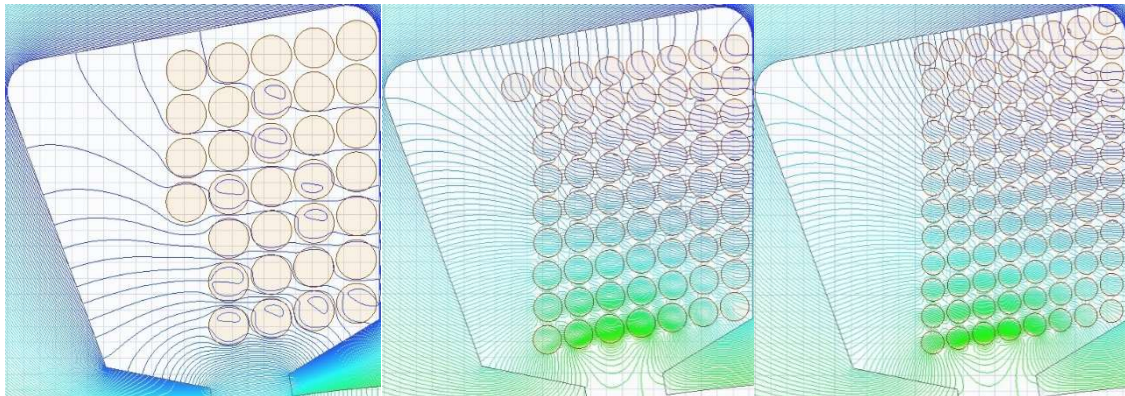
Obr. 46: Průběh ztrát ve vinutí do 50 kHz



Obr. 47: Průběh ztrát ve vinutí do frekvence 2 kHz

Použitím tří paralelních vodičů vzrostly ztráty ve vinutí o 3,3 % při frekvenci 10 Hz. Při stejné frekvenci konfigurace s  $n_p = 2$  redukovala ztráty o 3,5 %. V oblasti vysokých frekvencí došlo k výraznějšímu nárůstu ztrát ve vinutí. Cívka s  $n_p = 2$  dosáhla maximálního navýšení ztrát 17,5 % při frekvenci 100 kHz. Cívka s  $n_p = 3$  dosáhla maximální hodnoty navýšení ztrát 46,9 % při frekvenci 150 kHz.

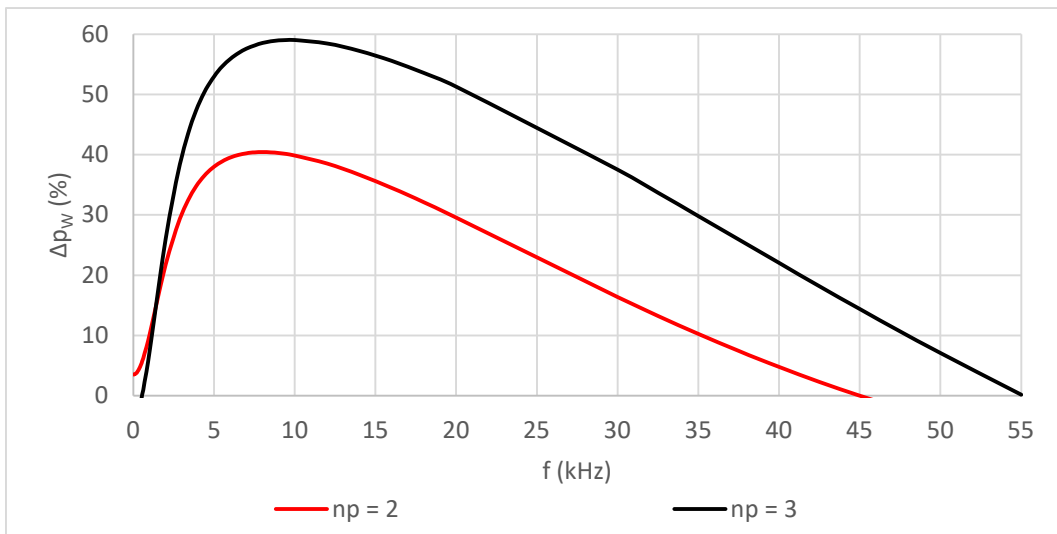
Uvedené konfigurace byly opět porovnány při frekvenci 150 kHz, kdy se již neuplatňuje efekt redukce ztrát. Výchozí cívka s  $n_p = 1$  v této oblasti vykazuje nejnižší maximální hodnotu proudové hustoty ze zkoumaných konfigurací. V případě cívek s  $n_p > 1$  došlo vlivem volby vodičů menšího průměru ke změně rozložení magnetického toku. Rozptylový magnetický tok v blízkosti otevření drážky se primárně uzavírá skrze závit cívek s  $n_p = 2$  a 3. Vysoká koncentrace magnetického toku způsobí nárůst magnetické indukce ve vodiči a ztrát. V případě výchozí cívky je rozptylový tok v blízkosti otevření drážky vytlačován ze závitů. Rozložení magnetického toku je uvedeno na Obr. 48. Vlivem rozptylového toku došlo u konfigurací s  $n_p > 1$  k vzrůstu maxima proudové hustoty, ale uvedené konfigurace stále vykazují nelinearitu rozložení proudu na menší ploše závitů než v případě výchozí cívky.



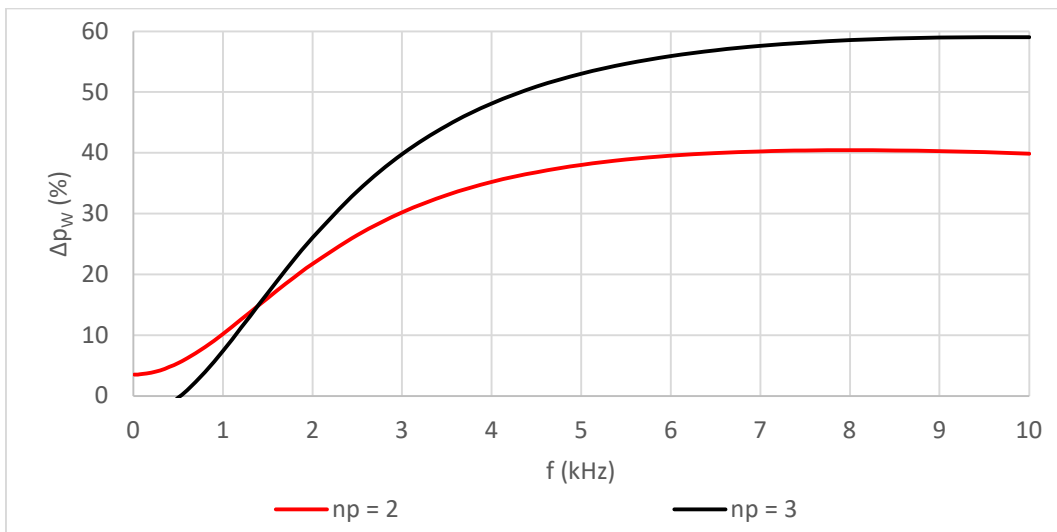
Obr. 48: Rozptylový magnetický tok v drážce při frekvenci 150 kHz. Vinutí s  $n_p = 1$  (vlevo),  $n_p = 2$  (uprostřed),  $n_p = 3$  (vpravo)



Vinutí navinuté ze dvou paralelních vodičů omezuje ztráty až o 40,5 % při frekvenci 8 kHz. Vinutí se třemi paralelními vodiči redukuje ztráty až o 59,1 % při frekvenci 9,5 kHz. Efekt redukce ztrát zobrazuje Obr. 49 a Obr. 50.



Obr. 49: Redukce ztrát ve vinutí s vyšším počtem paralelních vodičů



Obr. 50: Redukce ztrát ve vinutí do 10 kHz

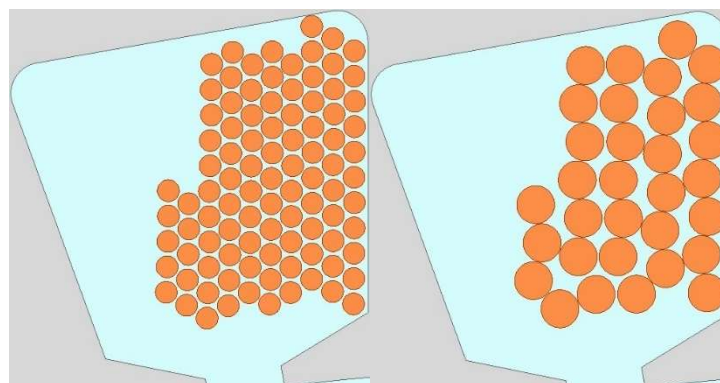
## 2.9 Litz wire konfigurace

Navyšování počtu paralelních vodičů vede k výraznějšímu omezení ztrát ve vinutí. Problém však nastává při  $n_p = 6$ , kdy je již velice obtížné vinutí vyrobit. Problém se dá vyřešit použitím Litz wire. Jedná se o svazkový vodič složený z navzájem izolovaných paralelních vodičů. Použití Litz wire je finančně nákladné.

Problém simulace velkého počtu paralelních vodičů spočívá v tvorbě a správném nastavení modelu. Ručně vytvářet vinutí o vyšším počtu paralelních vodičů není z časových důvodů příliš rozumné. Další problém představuje samotná náročnost simulace. Velký počet miniaturních prvků v simulaci povede na velmi hustou síť modelu a dlouhou dobu výpočtu simulace. Například výpočet simulace výchozího modelu s  $n_p = 1$  a Eddy Current simulací trvá okolo 10 minut. Simulace s  $n_p = 3$  se počítala přes 2 hodiny.

Uvedený problém lze částečně řešit modelováním závitu ekvivalentního průřezu, který by nahrazoval veliký počet miniaturních vodičů v simulaci. Tím dojde k nárůstu chyby modelu, ale také k omezení nároků na přípravu modelu a výpočet simulace.

Pro účely prvotního testování byl upraven model cívky se třemi paralelními vodiči. V modelu došlo ke změně rozložení vodičů uvnitř drážky. Závit v simulaci tvoří tři vodiče v trojúhelníkovém uspořádání. Model je simulován opět pomocí externího obvodu a slouží k porovnání výsledků Litz wire simulací. Poté byl vytvořen Litz wire model, ve kterém jsou původní závity nahrazeny vodičem ekvivalentního průřezu. Na upraveném modelu jsou následně testována nastavení Litz Wire simulace. Vytvořené modely jsou zobrazeny na Obr. 51.



Obr. 51: Konfigurace testující nastavení Litz wire v modelu.

Ansyes nabízí dvě možnosti simulace Litz wire vinutí. První možností je vytvoření vinutí standardní cestou, kdy jsou v modelu rozmístěny vodiče ekvivalentního průřezu. V nastavení vinutí je potřeba zadat příslušný počet paralelních vodičů a změnit typ vinutí ze Solid na Stranded. Vinutí jsou následně přiřazovány cívky (závity) o počtu drátů odpovídajících počtu paralelních vodičů. Externí obvod není pro simulaci potřeba kreslit.

Druhá možnost spočívá ve změně nastavení materiálu vinutí, který je přiřazen ekvivalentním vodičům. Nastavení materiálu obsahuje kolonku Composition, kde lze nastavit Litz wire. Dále je potřeba v nastavení materiálu nastavit typ vodiče, počet vodičů a průměr vodiče. Průměrem vodiče je myšlen průměr jednoho paralelního vodiče. Příklad nastavení materiálu je uveden na Obr. 52. Vinutí je potřeba opět nastavit jako Stranded tentokrát však s jedním paralelním vodičem. Cívky přiřazované k vinutí jsou také tvořeny jedním vodičem.

Name	Type	Value	Units
Relative Permittivity	Simple	1	
Relative Permeability	Simple	0.999991	
Bulk Conductivity	Simple	58000000	siemens/m
Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
Core Loss Model		None	w/m <sup>3</sup>
Mass Density	Simple	8933	kg/m <sup>3</sup>
Composition		Litz Wire	
- Wire Type		Round	
- Strand Number	Simple	1	
- Twisting Length Factor	Simple	1	
- Wire Diameter	Simple	0.71	mm

Obr. 52: Příklad nastavení Litz wire konfigurace v materiálu vinutí

Oba způsoby nastavení simulace vedou ke stejným výsledkům. Modely Litz wire v porovnání s fyzicky modelovanými vodiči vykazují do frekvence 20 kHz odchylku ztrát v železe menší než 1 %. Při frekvenci 45 kHz je odchylka ztrát v železe 5 %. Maximální odchylka ztrát v železe je 22 % při frekvenci 300 kHz. Vytvořené modely vykazují vyšší ztráty v železe než model s ručně modelovanými paralelními vodiči.

Ztráty ve vinutí se v případě Litz wire modelů a fyzicky modelovaných vodičů liší o méně než 1 % až do frekvence 14 kHz. Při 20 kHz začnou modely vykazovat 5 % odchylku ztrát ve vinutí. Odchylka ztrát ve vinutí následně výrazně roste. Při frekvenci 55 kHz je odchylka již 50 %. Při frekvenci 80 kHz je odchylka větší než 100 %. Při frekvenci 300 kHz velikost odchylky přesáhne hodnotu 1000 %.

Modelování malého počtu paralelních vodičů pomocí Litz wire nastavení je možné. Vytvořené simulace s Litz wire nastavením nabízejí úsporu času nutného na přípravu a výpočet simulace. Uvedeným nastavením vzniká chyba modelu, která v oblasti nízkých frekvencí nemusí nabývat vysokých hodnot. Pro simulaci vysokých frekvencí (například 100 kHz) již bude nutné využít model s fyzicky modelovanými vodiči. Použití zjednodušených modelů bude silně závislé na velikosti modelovaných vodičů. Modely s většími průměry vodičů by teoreticky mohly být přesné do nižších frekvencí než 20 kHz. Aplikace Litz wire nastavení bude možná, pokud uživatel provede srovnávací simulace. Na základě srovnávacích simulací jednoduchých modelů bude možné stanovit frekvenční pásmo ve kterém je zjednodušený model přesný.

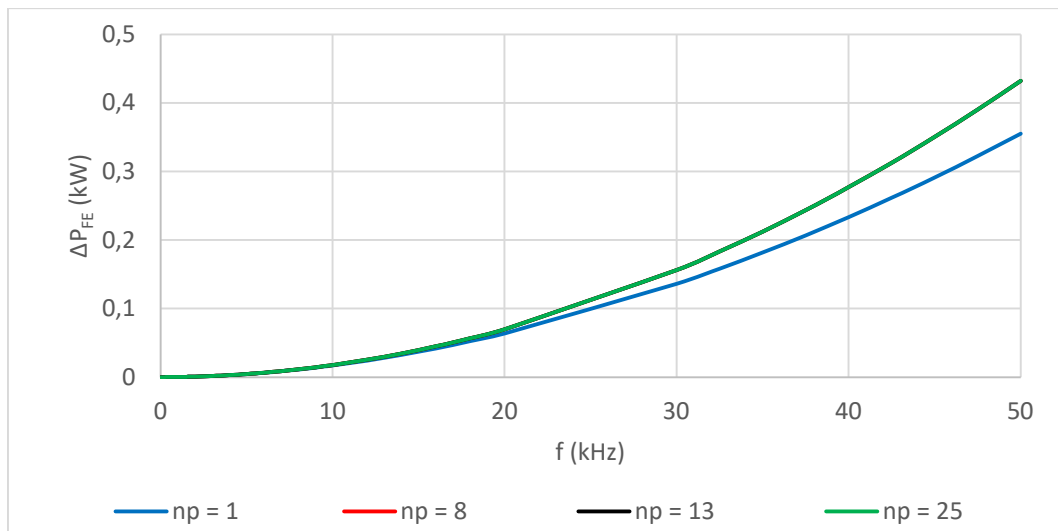
S Litz wire nastavením byly zkoumány konfigurace tří odlišných cívek z Tab. 6.

Tab. 6: Tabulka konfigurací cívek použitých při testování Litz wire simulací

$d$ (mm)	$n_p$	$N$	$S_c$ (mm <sup>2</sup> )	$K_t$ (%)	$d_{ekv}$ (mm)
0,71	3	18	42,759	39,353	1,230
0,45	8	18	45,804	42,156	1,273
0,35	13	18	45,027	41,440	1,262
0,25	25	18	44,179	40,660	1,250

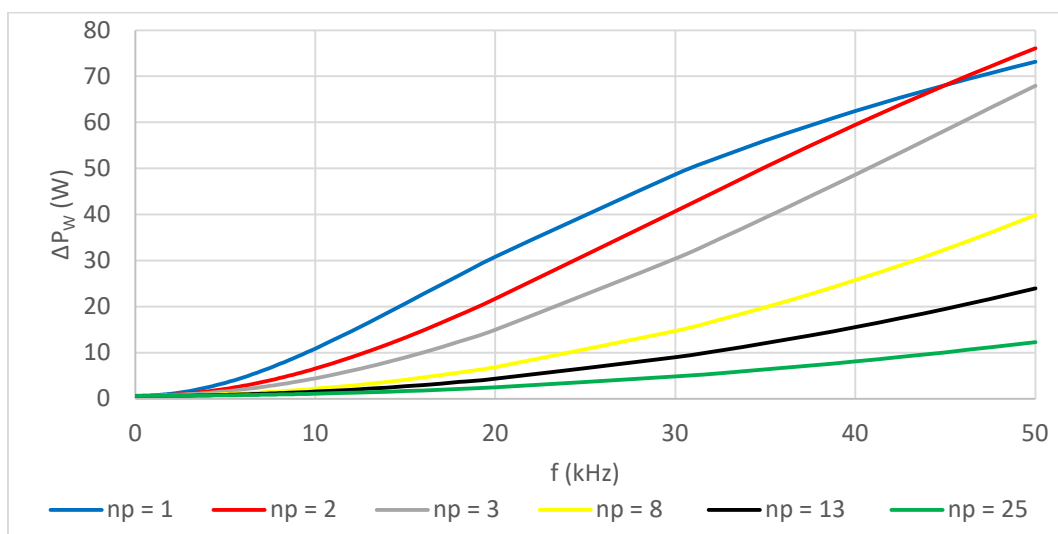
Proměnná  $d_{ekv}$  značí ekvivalentní průměr vodiče.

Modely Litz wire simulací využívají obdobné rozvržení vodičů jako výchozí model cívky s jedním paralelním vodičem. Frekvenční rozsah simulací je omezen na 50 kHz. Skin efekt u zvolených vodičů se začíná objevovat až při frekvencích vyšších než 100 kHz.



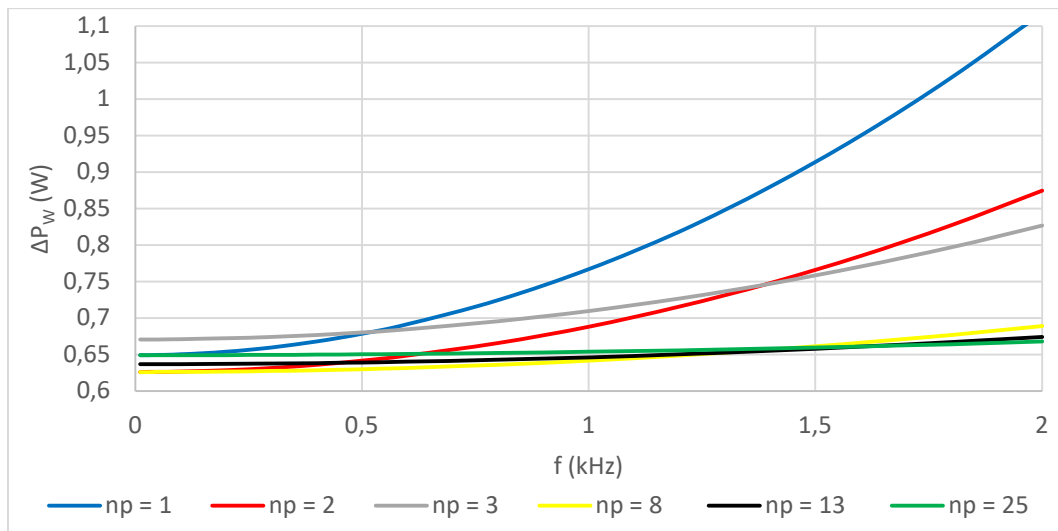
Obr. 53: Ztráty v železe Litz wire simulací

Z Obr. 53 je patrné, že Litz wire simulace dosahují stejných ztrát v železe v celém frekvenčním rozsahu. V porovnání s výchozím modelem cívky s  $n_p = 1$  navyšují Litz wire konfigurace ztráty až o 22 %. Navýšení ztrát v železe je lineární. Do 7 kHz se ztráty v železe liší o méně než 2 % od výchozího modelu.

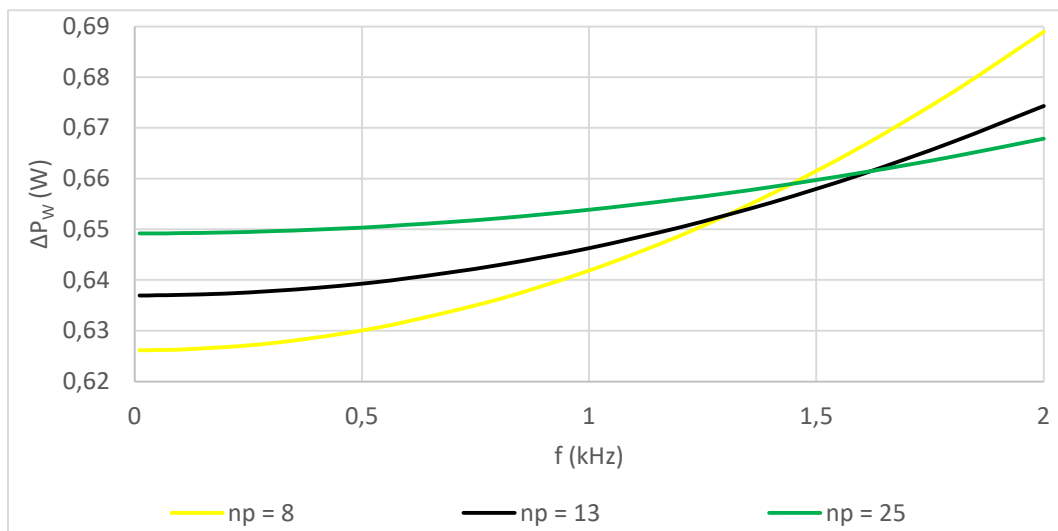


Obr. 54: Ztráty ve vinutí Litz wire simulací

Z výsledků simulací je patrný výrazný vliv navýšení počtu paralelních vodičů na efekt redukce ztrát ve vinutí. Obr. 54 a Obr. 55 slouží pouze k porovnání simulací zabývajících se změnou počtu paralelních vodičů.

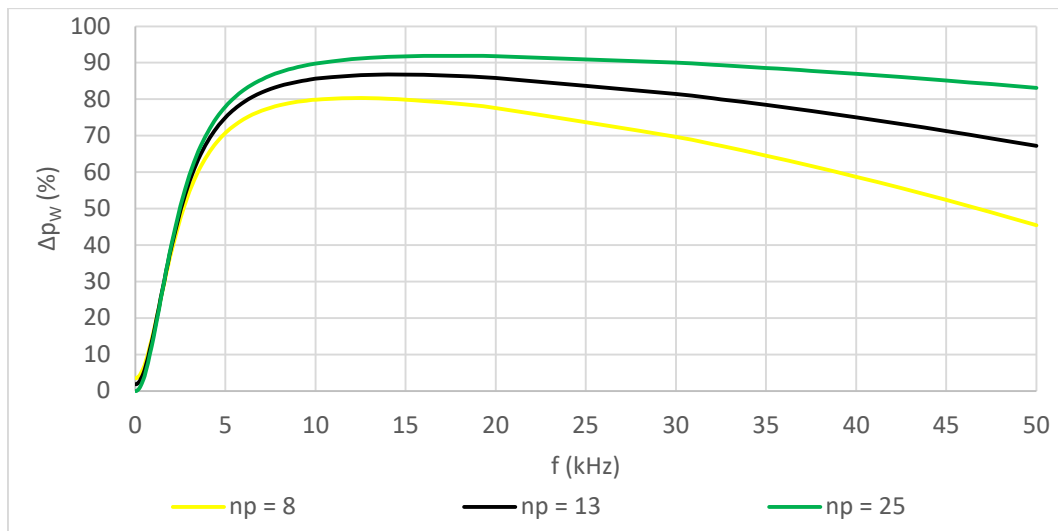


Obr. 55: Ztráty ve vinutí Litz wire simulacích do 2kHz v porovnání s ostatními simulacemi paralelních vodičů



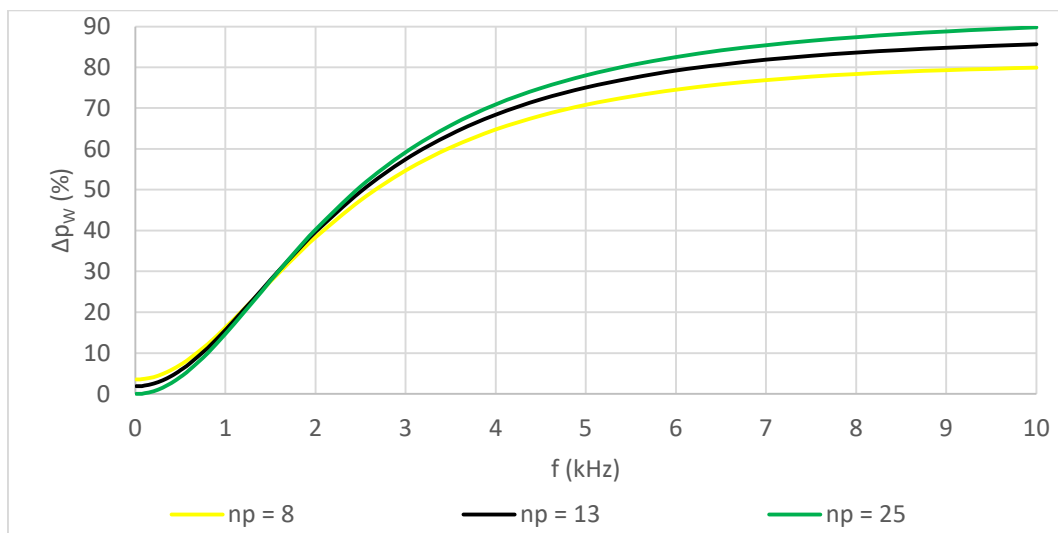
Obr. 56: Ztráty ve vinutí Litz wire simulacích do 2kHz

Z Obr. 56 je patrný nárůst ztrát při frekvenci 10 Hz způsobený zmenšujícím se průměrem vodiče. Konfigurace s  $n_p = 25$  vykazuje při 10 Hz stejné ztráty ve vinutí jako výchozí cívka s  $n_p = 1$ . Konfigurace s  $n_p = 13$  a  $n_p = 8$  jsou modelovány ekvivalentním vodičem o průřezu větším než 1,25 mm a při stejné frekvenci dosahují menších ztrát. Stále platí totožné chování jako v případě simulací s nižším počtem paralelních vodičů. Od frekvence 1,6 kHz vodič 0,25 mm generuje ze všech konfigurací nejmenší ztráty ve vinutí.



Obr. 57: Redukce ztrát ve vinutí při použití Litz wire

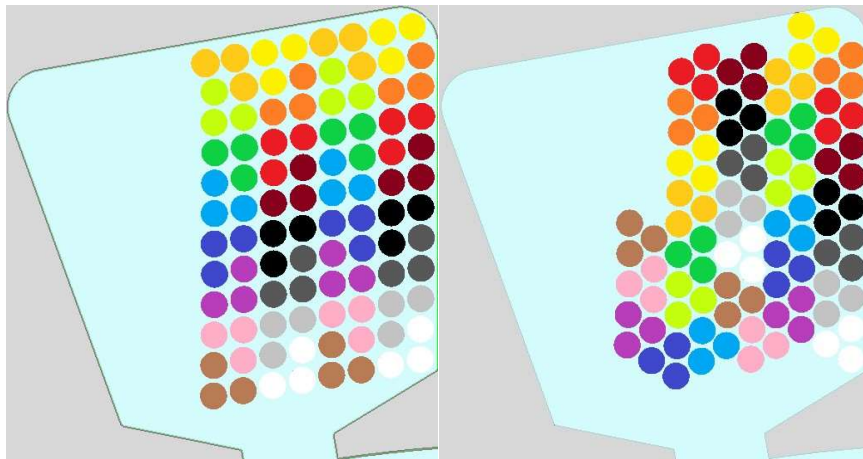
Ze všech zkoumaných úprav bylo použitím Litz wire dosaženo nejvyššího omezení ztrát ve vinutí. Použitím osmi paralelních vodičů došlo k 80,3 % redukci ztrát při frekvenci 12 kHz. Cívka s  $n_p = 13$  dosáhla maximální redukce ztrát 86,8 % při frekvenci 14 kHz. Cívka s 25 paralelními vodiči omezuje ztráty až o 91,9 % při frekvenci 18 kHz. Pro frekvence vyšší než 18 kHz efekt redukce ztrát všech konfigurací klesá. Podle trendu poklesu redukce ztrát lze soudit, že při frekvencích nad 100 kHz přestanou zkoumané konfigurace omezovat ztráty ve vinutí. Průběhy redukce ztrát jsou znázorněny Obr. 57 a Obr. 58.



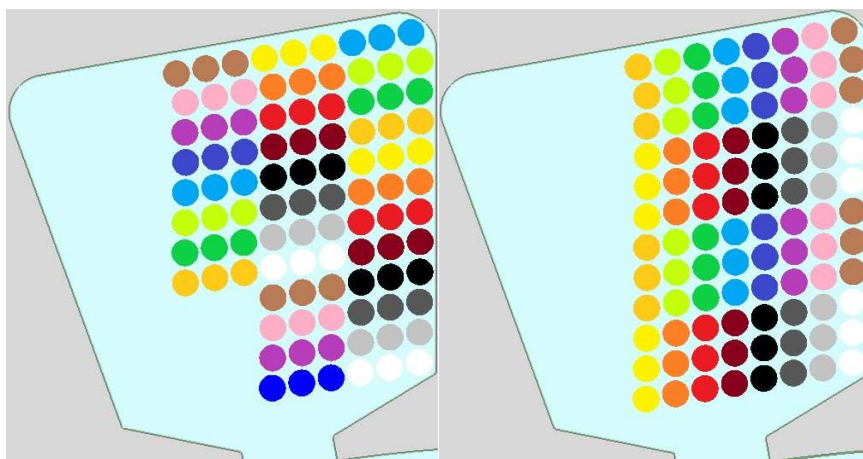
Obr. 58: Redukce ztrát ve vinutí do 10 kHz

## 2.10 Vliv tvaru závitu

Poslední simulace vytvořené v rámci diplomové práce zkoumají vliv tvaru závitu na velikosti ztrát ve vinutí. Pro simulace byl využit model vinutí se třemi paralelními vodiči. Porovnávají jsou 4 různé případy. První model vinutí je představen již v podkapitole 2.8, kde jsou závity uspořádány do tvaru písmene L. Druhý model je popsán v podkapitole 2.9, kde jsou závity umístěny do trojúhelníkového uspořádání. Třetí i čtvrtý model má závit tvarován do tvaru písmene I. Modely se mezi sebou liší pouze způsobem uložení závitů, kdy jeden model má závity uloženy horizontálně a druhý vertikálně. Model s tvarem závitu připomínajícím písmeno L je zvolen za výchozí simulaci, se kterou jsou ostatní uspořádání srovnávána. Tvary jednotlivých závitů zobrazuje Obr. 59 a Obr. 60.



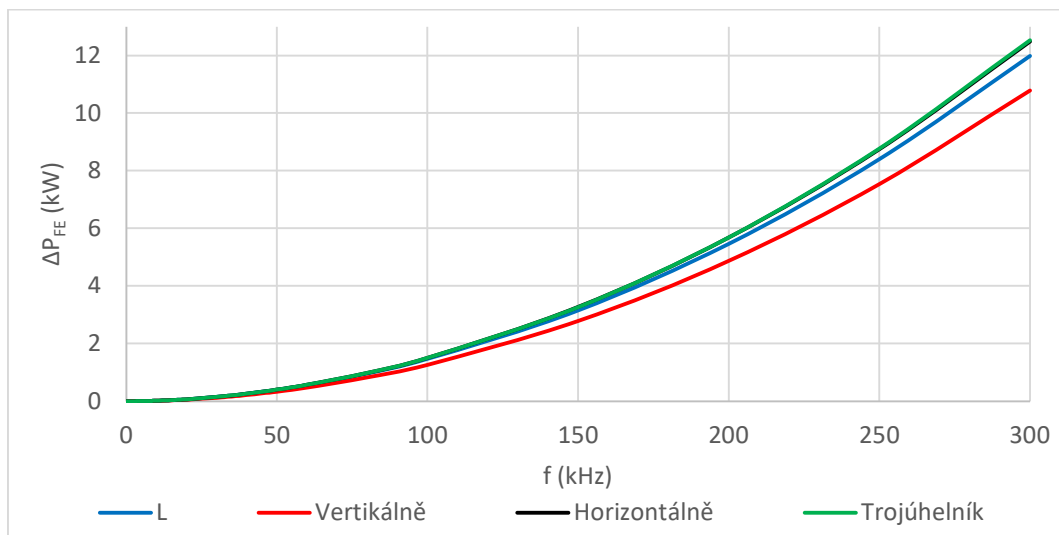
Obr. 59: Tvary závitů v modelech s  $n_p = 3$ . L (vlevo) a trojúhelník (vpravo)



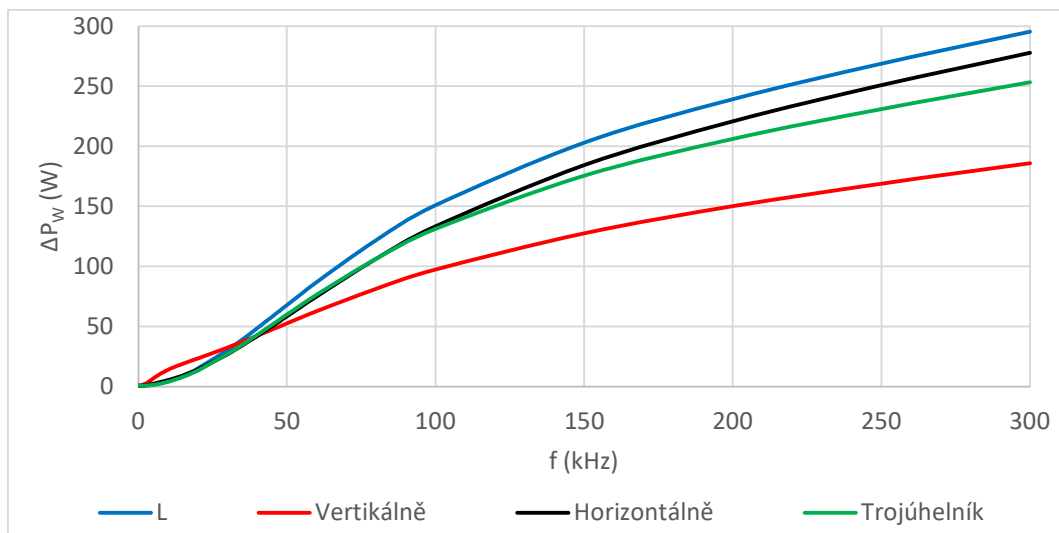
Obr. 60: Uspořádání závitů v modelech, horizontální (vlevo) a vertikální (vpravo)



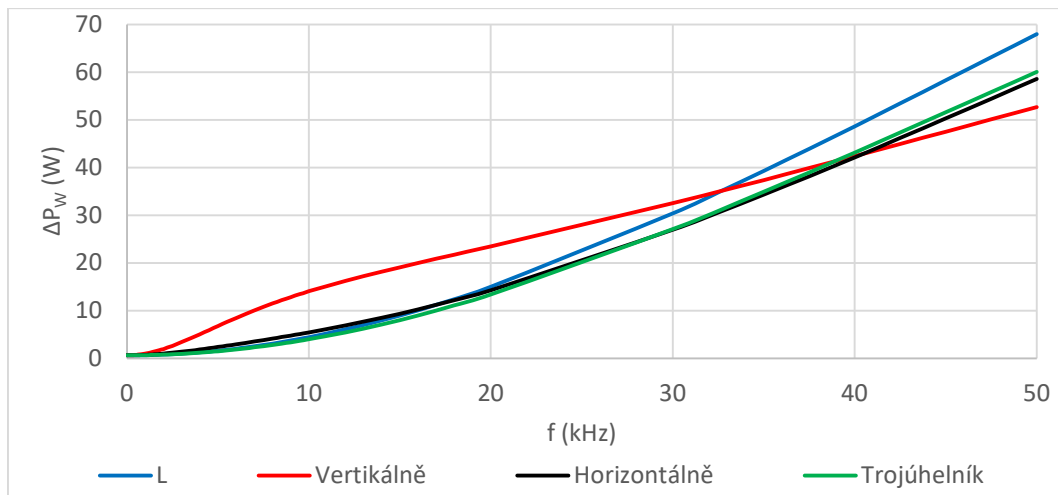
Ztráty v železe omezilo pouze vertikální uspořádání závitů, a to v celém frekvenčním rozsahu. Vertikální uspořádání maximálně omezuje ztráty o 17,2 % při frekvenci 30 kHz. Velmi podobné ztráty v železe generují konfigurace s horizontálně uloženými závitmi a s trojúhelníkovým uspořádáním závitů, které se od výchozí konfigurace s tvarem závitu L liší maximálně o 4,6 %. Průběh ztrát v železe je uveden na Obr. 61. Průběhy ztrát ve vinutí jsou uvedeny na Obr. 62, Obr. 63 a Obr. 64.



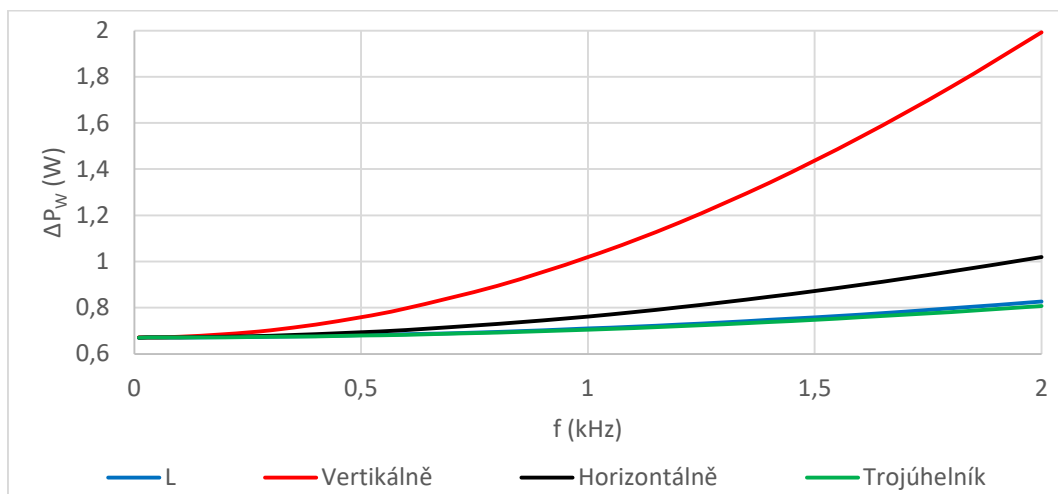
Obr. 61: Ztráty v železe pro rozdílné tvary závitů



Obr. 62: Průběh ztrát ve vinutí při změně tvaru závitu



Obr. 63: Průběhy ztrát ve vinutí při změně tvaru závitu vykreslené do frekvence 50 kHz

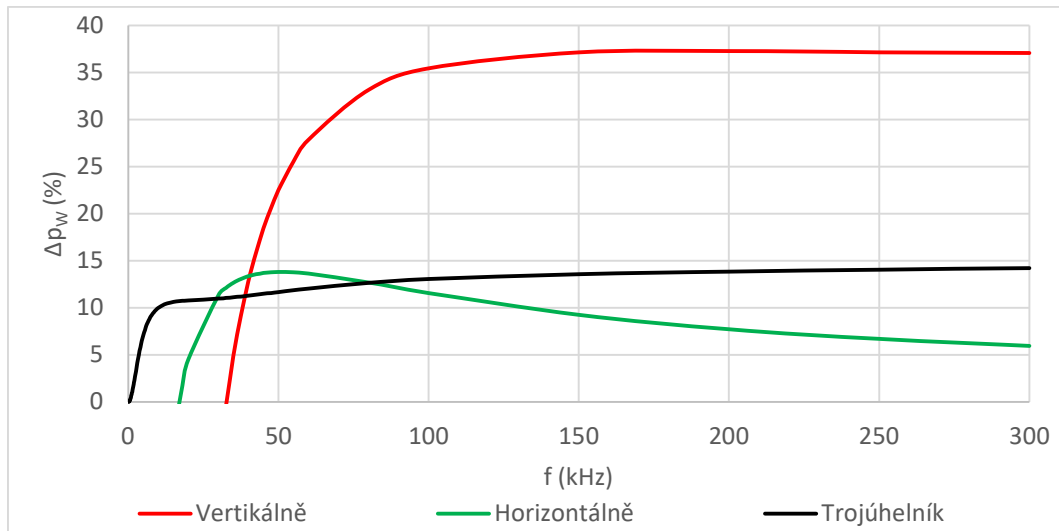


Obr. 64: Velikost ztrát ve vinutí při změně tvaru závitu do 2 kHz

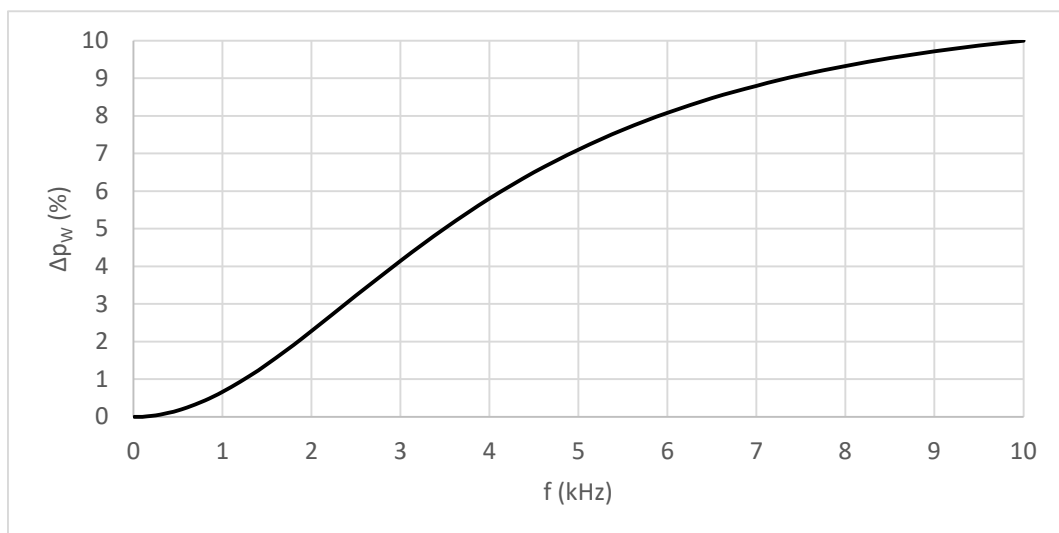
Ztráty ve vinutí vertikální uspořádání závitů výrazně navýšilo. Od 10 Hz do 32,5 kHz vertikální uspořádání vykazuje vyšší ztráty ve vinutí než výchozí konfigurace. Maximální navýšení ztrát nastalo při frekvenci 5,5 kHz, kdy konfigurace navýšila ztráty o 316,3 %. Pro frekvence vyšší než 32,5 kHz konfigurace začíná ztráty ve vinutí výrazně omezovat. Paradoxně tato konfigurace dosáhla nejvyšší redukce ztrát ve vinutí (viz Obr. 65). Maximální redukce ztrát je 37,3 % při frekvenci 200 kHz.

Horizontální uspořádání závitů také zvýšilo ztráty ve vinutí. Uspořádání navyšuje ztráty od 10 Hz do 16 kHz. Výrazné navýšení ztrát nastává v rozmezí od 1,8 kHz do 10 kHz, kdy uspořádání navýšilo ztráty o více než 20 %. Maximální nárůst ztrát činí 46,6 % při frekvenci 4,5 kHz. Od frekvence 16 kHz do 300 kHz horizontální uspořádání ztráty redukuje. Maximální redukce ztrát 13,8 % bylo dosaženo při frekvenci 50 kHz. S rostoucí frekvencí se efekt redukce ztrát opět vytrácí.

V oblasti nízkých frekvencí poskytuje nejlepší výsledky uspořádání závitů do trojúhelníku, kde uspořádání jako jediné omezilo velikost ztrát ve vinutí. Do frekvence 2 kHz je redukce ztrát menší než 2 %. V rozmezí od 2 kHz do 9 kHz dochází k výraznému růstu redukce ztrát ve vinutí, které přesáhne hodnotu 10 %. Pro frekvence vyšší než 9 kHz již nedochází k výraznější redukci ztrát. Maximální redukce ztrát 14,2 % byla zaznamenána při frekvenci 300 kHz. Detailnější průběh redukce ztrát trojúhelníkového uspořádání je zobrazen na Obr. 66.



Obr. 65: Redukce ztrát ve vinutí při změně tvaru závitu



Obr. 66: Redukce ztrát ve vinutí při použití trojúhelníkového uspořádání závitu

### 3 Měření cívek a validace ztrátových koeficientů modelu

#### 3.1 Měřené vzorky

Ze všech zkoumaných konfigurací cívek uvedených v předchozí kapitole byly navinuty pouze dvě konfigurace. První cívka s  $n_p = 1$  je navinuta z vodiče o průměru 1,25 mm. Druhá cívka s  $n_p = 3$  je navinuta z vodiče o průměru 0,71 mm. Dále byly navinuty dvě cívky z vodiče o průměru 0,35 mm s  $n_p = 1$  a  $n_p = 3$ . Cívka z vodiče 1,25 mm byla navinuta postupným omotáváním zubu, kdy vodič byl vkládán do drážky a následně utáhnut. Zvolená metodika umožnila vytvoření cívky s krátkou délkou čel vinutí, ale navíjení bylo obtížné. Při navíjení bylo navinuto pouze 32 závitů z původně zamýšlených 36. Návrh cívky s 36 závitů uvažoval 40 % plnění drážky, které je ručním navíjením dosažitelné. Ručním navíjením vznikají po celé délce vodiče deformace, které se projeví neefektivním využitím prostoru drážky. Při procesu navíjení byl drát často ohýbán a kvůli tuhosti vodiče bylo náročné drát zpětně narovnávat. Deformace vodičů spolu s nevhodným způsobem navíjení umožnily navinout pouze 32 závitů, což odpovídá 36 % plnění drážky. Při procesu navíjení docházelo k odírání izolace vodiče a s výslednou cívkou jsem nebyl spokojen. Ostatní cívky byly navinuty prošíváním drážek, které je zdlouhavé a opět dochází k častým ohybům vodiče. Prošíváním drážek bylo dosaženo také krátkých čel vinutí a v porovnání s předchozím postupem nedocházelo k oděru izolace o statorové plechy. Prošíváním drážek byly navíc navinuty cívky s více utaženými závitů a bylo dosaženo lepšího využití prostoru v drážce. Bylo by možné využít i alternativní postup spočívající ve výrobě vsypávaného vinutí, které by bylo zhotoveno na přípravku a následně vloženo do drážek. Výrobou vsypávaného vinutí by nedocházelo k častým ohybům vodičů, které mohou ovlivnit mechanické a elektroizolační vlastnosti materiálu. Alternativní postup by byl nejspíše šetrnější k izolaci. Délka čel vsypávaného vinutí je však delší než v případě prošívání drážek. V modelech neuvažuji délku čel vinutí, a proto omezením délky čel vinutí se snažím omezit odchylku mezi měřenými daty a daty z modelů.

Samotné navíjení však zanáší do vyhodnocení dodatečnou odchylku, která vzniká nepřesností modelů. Při modelování navinutých konfigurací mohu pouze odhadovat pozici jednotlivých vodičů v drážce, jelikož neznám jejich přesnou pozici v navinuté konfiguraci. Tato nepřesnost je však výraznější v případě cívek s  $n_p = 3$ , kde odchylka může být navýšena tvarem závitů. Při navíjení není možné kontrolovat a dodržet jednotný tvar závitů v celé cívce.

Cívky z vodiče o průměru 0,35 mm byly navinuty čistě pro stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice, pomocí které jsou v modelech počítány ztráty v železe. Závity obou cívek jsou úmyslně odsunuty od otevření drážky, aby bylo dosaženo co nejvíce lineárního rozložení proudu v závitech. Odsunutí vinutí bylo realizováno vložením dřevěných klínů do drážek. Navinuté konfigurace jsou uvedeny na Obr. 67.

Čela statorového paketu a stěny drážek jsou lakované barvou. Barva na čelech paketu však na většině míst chybí. Vnější hrany statorových zubů jsou přelepeny kaptonovou páskou, aby byl omezen oděr izolace při navíjení.



Obr. 67: Navinuté cívky. Vlevo cívka z vodiče o průměru 1,25 mm. Vpravo cívka z vodiče o průměru 0,71 mm. Druhá cívka zleva z vodiče o průměru 0,35 mm s  $n_p = 1$ . Druhá cívka zprava z vodiče o průměru 0,35 mm s  $n_p = 3$ .

Vypočtené odpory navinutých konfigurací jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7: Vypočtený odpor navinutých cívek

<b><math>d</math> (mm)</b>	1,25	0,71	0,35	0,35
<b><math>l_v</math> (m)</b>	5	4,7	4,5	4,5
<b><math>n_p</math></b>	1	3	1	3
<b><math>R</math> (mΩ)</b>	72,524	70,435	832,543	277,514

Výpočet odporu  $R$

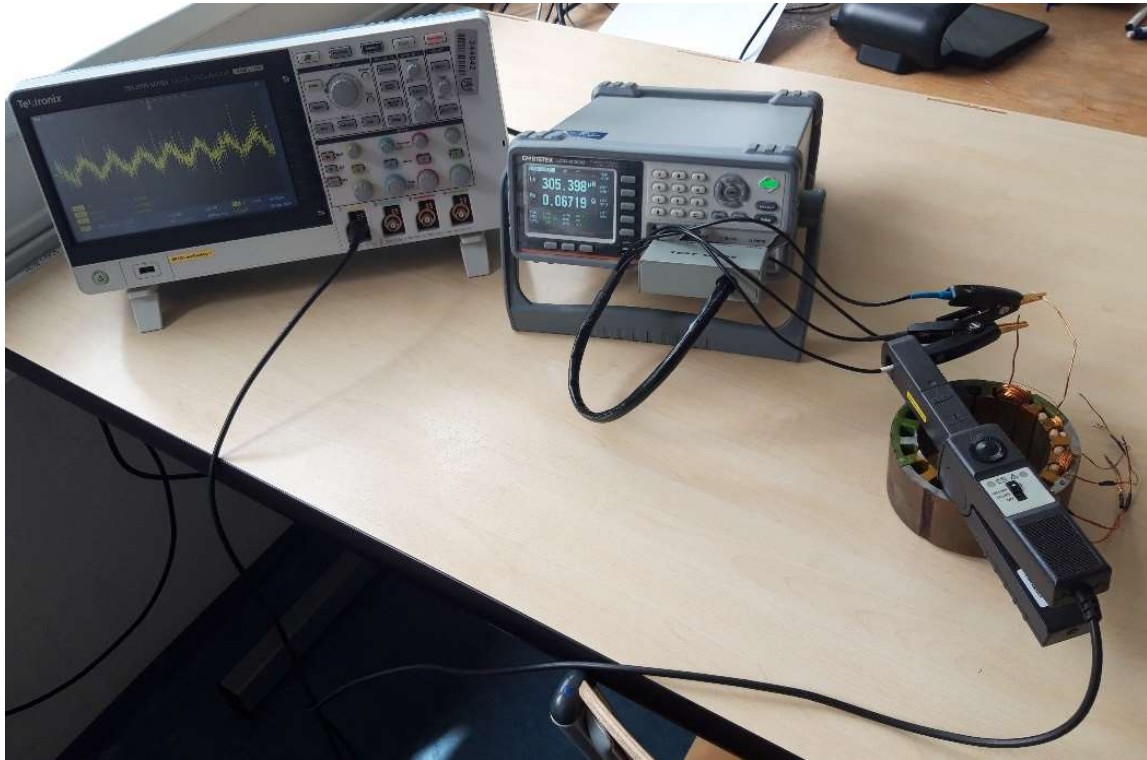
$$R = \frac{\rho \cdot l_v}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot n_p} = \frac{0,0178 \cdot 5}{\pi \cdot \left(\frac{1,25}{2}\right)^2 \cdot 1} = 72,524 \text{ m}\Omega, \quad (3.1)$$

kde  $l_v$  je délka vinutí.

Vypočtený odpor cívky z vodiče o průměru 1,25 mm byl ověřen měřením. Pro měření byl použit digitální mikro ohmmetr Cropico DO5000. Měřením byla zaznamenána hodnota 67,71 mΩ.

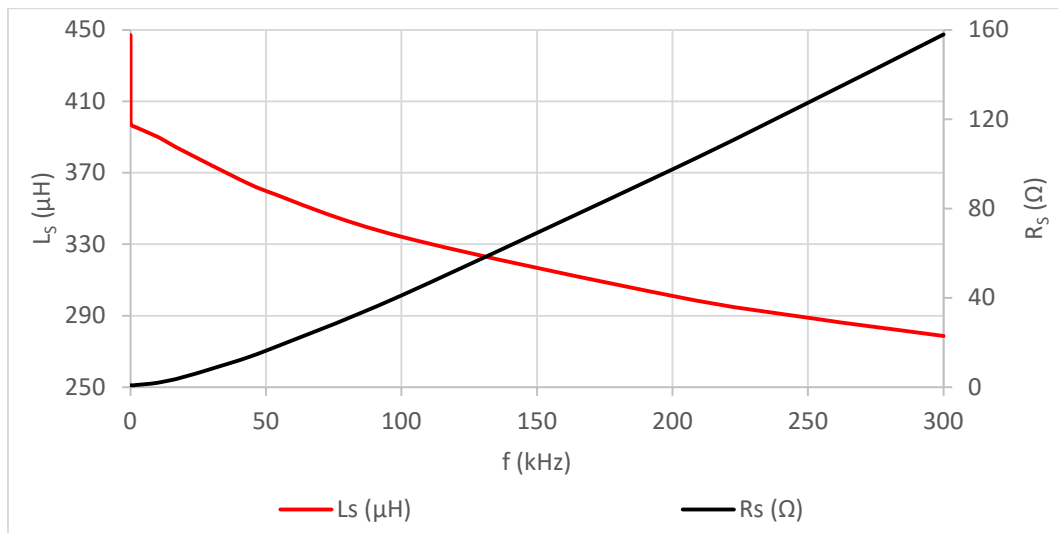
### 3.2 Měření

Navinuté cívky byly měřeny pomocí LRC metru GW INSTEK LRC-6300 a osciloskopu Tektronix TBS 2000. LRC metr byl nastaven pro měření sériové LR kombinace připojené k výstupu přístroje. Přístrojem bylo potřeba změřit závislost odporu na frekvenci. Změřené hodnoty odporu jsou využity pro výpočet Jouleových ztrát, které představují celkové ztráty složené ze ztrát v železe a ve vinutí. Obě složky celkových ztrát je při vyhodnocení nutné oddělit. LRC metr je zároveň zdrojem měřeného obvodu. Použité přístroje a zapojení obvodu je uvedeno na Obr. 68. Napětový rozsah LRC metru byl nastaven na hodnotu 1 V. Pomocí osciloskopu a proudové sondy byla měřena efektivní hodnota proudu procházejícího obvodem. Efektivní hodnota proudu při všech měřeních byla 15 mA. Cívky byly měřeny při frekvencích v rozsahu od 10 Hz do 300 kHz. Frekvence v obvodu byla nastavována pomocí LRC metru z předvolby přístroje.



Obr. 68: Měření sériové LR kombinace

Pomocí naměřených hodnot bylo následně dopočteno napětí v obvodu, impedance a Jouleovy ztráty. Příklad změřených hodnot odporu a indukčnosti cívky je uveden na Obr. 69. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v následujících kapitolách.



Obr. 69: Závislost  $R_s$  a  $L_s$  na frekvenci vynesená z naměřených hodnot cívky 0,35 mm s  $n_p = 1$

Pro porovnání výsledků měření a simulací je nutné modely adekvátně nastavit. Nastavení probíhá stanovením ztrátových koeficientů Steinmetzovy rovnice, které je nutné v Ansysu nastavit přiřazenému materiálu. Uvedené koeficienty se stanovují měřením. Například měřením plechů vyskládaných do Epsteinova rámu. Volbou již použitého satorového balení bylo znemožněno měření plechů a následné stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice. Neznámé koeficienty je však nutné stanovit. Koeficienty neznámého materiálu byly stanoveny alternativní experimentální metodou popsanou v následující podkapitole.

### 3.3 Stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice

Vlivem střídavé magnetizace plechů dochází v železe ke vzniku hysterezních ztrát, ztrát vířivými proudy a ztrát přídavných. Tyto ztráty lze popsat Steinmetzovou rovnicí: [5, 19]

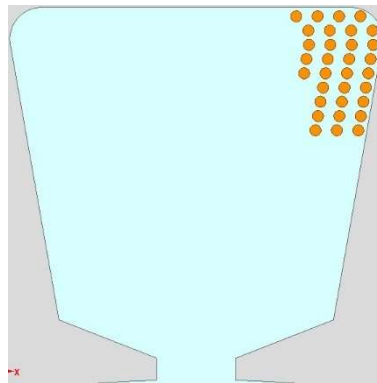
$$\begin{aligned} \Delta P_{FE} &= \Delta P_h + \Delta P_c + \Delta P_e = \\ &= k_h \cdot B_{max}^\alpha \cdot f + k_c \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 + k_e \cdot B_{max}^{1,5} \cdot f^{1,5}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

kde  $\Delta P_h$  jsou ztráty hysterezní,  $\Delta P_c$  ztráty vířivými proudy,  $\Delta P_e$  jsou přídavné ztráty,  $B_{max}$  maximální hodnota magnetické indukce,  $\alpha$  koeficient stanovený empiricky. Koeficient  $k_h$  stanovuje hysterezní ztráty,  $k_c$  ztráty vířivými proudy a  $k_e$  ztráty přídavné. Velikost koeficientu je závislá na druhu materiálu a velikosti magnetické indukce. [19] Pro nastavení modelů volím  $\alpha = 2$ .

Ztrátové koeficienty Steinmetzovy rovnice byly stanoveny z naměřených dat pomocí numerické aproximace metodou nejmenších čtverců. Při numerické aproximaci vycházel koeficient  $k_c$  téměř nulový a pro stanovení ztrát modelem byl zanedbán. Výsledná podoba Steinmetzovy rovnice pro výpočet ztrát v železe je:

$$\Delta P_{FE} = \Delta P_h + \Delta P_e = k_h \cdot B_{max}^2 \cdot f + k_e \cdot B_{max}^{1,5} \cdot f^{1,5} \quad (3.3)$$

Pro stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice byl vytvořen model cívky z vodiče o průměru 0,35 mm s  $n_p = 1$ . Model sdílí nastavení s původní šablonou všech modelů z podkapitoly 2.2. Podoba modelu je uvedena na Obr. 70.



Obr. 70: Model cívky navinuté z vodiče o průměru 0,35 mm

Postup stanovení koeficientů je následující. Nejprve z modelu cívky stanovíme energii magnetického pole v železe. Ta je stanovena pomocí Field kalkulátoru. Celková energie magnetického pole v železe se stanoví rovnicí 3.4.

$$W_m = \int W \cdot dS = 3,346 \cdot 10^{-3} \text{ J} \quad (3.4)$$

Energie je ve 2D modelu stanovena plošným integrálem, jelikož Field kalkulátor neuvažuje hloubku modelu a počítá energii pouze z plochy modelované výseče. Plocha  $S$  1/6 statorového plechu je  $6,192 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .

Dále je potřeba vypočítat hustotu energie magnetického pole  $w_m$ .

$$w_m = \frac{W_m}{S} = \frac{3,346 \cdot 10^{-3}}{6,192 \cdot 10^{-4}} = 5,404 \cdot 10^{-6} \text{ J/m}^2 \quad (3.5)$$



Před výpočtem indukce magnetického pole je potřeba stanovit relativní permeabilitu nastaveného materiálu. Relativní permeabilita plechů byla vypočtena z BH charakteristiky materiálu:

$$\mu_r = \frac{B}{H \cdot \mu_0} = \frac{0,4}{66 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 4822,877, \quad (3.6)$$

kde  $H$  je intenzita magnetického pole. Vinutí v simulaci je napájeno proudem o efektivní hodnotě 15 mA, které generuje slabé magnetické pole. Magnetické pole ve statoru je v tomto případě popsáno počátkem lineární části BH charakteristiky.

Předposledním krokem postupu je výpočet referenční hodnoty indukce magnetického pole  $B_{ref}$

$$\begin{aligned} B_{ref} &= \sqrt{4 \cdot w_m \cdot \mu_0 \cdot \mu_r} = \\ &= \sqrt{4 \cdot 5,404 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 4822,877} = 3,619 \cdot 10^{-4} \text{ T} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Posledním krokem je stanovení koeficientů  $k_h$  a  $k_e$ . Tento krok vyžaduje použití naměřených hodnot, ze kterých jsou vypočteny Jouleovy ztráty. Vypočtené ztráty jsou importovány do vytvořeného Matlab skriptu, který ztráty proloží metodou nejmenších čtverců. Výsledkem skriptu jsou koeficienty  $k_1$  a  $k_2$  pro které platí rovnice:

$$\Delta P_{FE} = k_1 \cdot f + k_2 \cdot f^{1,5} \quad (3.8)$$

Pravá strana rovnice (3.8) se musí rovnat s pravou stranou rovnice (3.3).

Model v Ansysu počítá ztráty v železe vstažené na objem tělesa a rovnici (3.3) je nutno upravit do tvaru:

$$\Delta P_{FE} = (k_h \cdot B_{max}^2 \cdot f + k_e \cdot B_{max}^{1,5} \cdot f^{1,5}) \cdot V \quad (3.9)$$

Objem  $V$  modelované části statorového paketu je  $3,096 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ .

Z rovnic (3.8) a (3.9) jsou následně vyjádřeny koeficienty  $k_h$  a  $k_e$ .

$$k_h = \frac{k_1}{B_{ref}^2 \cdot V} = \frac{2,579 \cdot 10^{-8}}{(3,619 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 3,096 \cdot 10^{-5}} = 6358,304 \quad (3.10)$$

$$k_e = \frac{k_2}{B_{ref}^{1,5} \cdot V} = \frac{2,121 \cdot 10^{-10}}{(3,619 \cdot 10^{-4})^{1,5} \cdot 3,096 \cdot 10^{-5}} = 0,995 \quad (3.11)$$

Platnost celého postupu byla ověřena na modelu tlumivky popsaném v podkapitole 3.4.

Stanovení koeficientů je provedeno za předpokladu, kdy ztráty statorového paketu výrazně převyšují ztráty ve vinutí. Model cívky z vodiče 0,35 mm se stanovenými koeficienty tuto podmínku splňuje při frekvenci 20 kHz, kdy jsou ztráty v železe 7x větší než ztráty ve vinutí. Model s původními koeficienty při stejné frekvenci vykazuje 9x vyšší ztráty v železe. Při této frekvenci je možné již ztráty ve vinutí zanedbat.

Skript vytvořený v Matlabu prokládá křivku ztrát v rozmezí od 10 kHz do 100 kHz. V tomto frekvenčním pásmu bylo dosaženo nejmenších odchylek proložení. Přesnost proložení je znázorněna v Tab. 8.

Tab. 8: Chyba proložení vypočtených ztrát

$f$ (kHz)	$\Delta$ (%)	$f$ (kHz)	$\Delta$ (%)
0,01	-99,871	40	-0,031
0,05	-99,333	50	-1,026
0,1	-98,636	100	0,097
1	-84,412	200	9,804
2	-67,699	250	14,895
10	0,184	300	19,800
20	4,832		

Uvedený výpočet koeficientů je potřeba iterovat. Nejprve je potřeba iterovat koeficienty  $k_h$  a  $k_e$ . Změnou ztrátových koeficientů modelu dojde ke změně energie magnetického pole v modelu. Nové hodnoty energie magnetického pole je nutné použít pro výpočet nových koeficientů  $k_h$  a  $k_e$ . Uvedený postup byl opakován dvakrát.

Druhá iterace spočívá ve výpočtu celkových ztrát modelu, které jsou následně importovány do skriptu. Skriptem nově stanovené koeficienty  $k_l$  a  $k_2$  jsou použity pro výpočet poměrných hodnot koeficientů

$$k = \frac{k_p}{k_i}, \quad (3.12)$$

kde  $k_i$  je koeficient stanovený iterací,  $k_p$  koeficient stanovený předchozím proložením křivky ztrát.

Pomocí poměrných hodnot jsou dále vypočteny nové koeficienty  $k_h$  a  $k_e$ , které se opět zadají do modelu. Uvedený postup byl několikrát opakován. Lichými iteracemi dochází k nárůstu koeficientů a sudými k jejich poklesu. S opakujícími se iteracemi dochází ke konvergenci koeficientů. Koeficienty se s postupujícími iteracemi dále vzdalují od prvně stanovených koeficientů. Pro finální nastavení modelů byly zvoleny koeficienty z druhé iterace, které se nejvíce blíží k prvně stanoveným koeficientům. Nalezené ztrátové koeficienty jsou uvedeny v Tab. 9. V Tab. 10 jsou uvedeny ztráty stanovené z naměřených hodnot, celkové ztráty modelu před i po iteračním procesu a chyba ztrát stanovených modelem. Dále je na Obr. 71 znázorněn průběh ztrát z měření a po druhé iteraci modelu.

Tab. 9: Koeficienty stanovené z měření a iteracemi

	Koeficienty stanovené z měření	1. iterace	2. iterace	3. iterace	4. iterace
$k_1$	2,579E-08	3,247E-08	2,717E-08	3,116E-08	2,804E-08
$k_2$	2,121E-10	1,795E-10	2,135E-10	1,782E-10	2,151E-10
$k_h$	6358,304	5048,997	6034,824	5262,444	5847,855
$k_e$	0,995	1,176	0,988	1,184	0,981

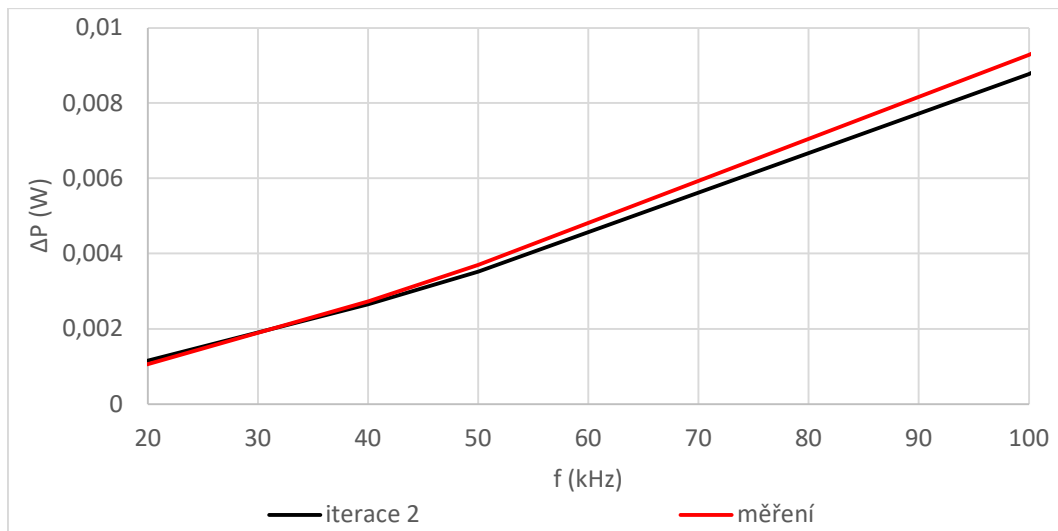
Tab. 10: Tabulka celkových ztrát vypočtených modelem, celkových ztrát získaných z změření a odchylek ztrát modelu od reality  $\Delta$ 

	Měření	Před iterací		Po 2. iteraci	
$f$ (kHz)	$\Delta P$ (mW)	$\Delta P$ (mW)	$\Delta$ (%)	$\Delta P$ (mW)	$\Delta$ (%)
0,01	0,205	0,129	36,773	0,129	36,779
0,05	0,205	0,130	36,226	0,130	36,258
0,1	0,205	0,132	35,548	0,132	35,613
1	0,209	0,161	22,865	0,159	23,515
2	0,218	0,198	9,566	0,195	10,820
10	0,469	0,578	-23,121	0,563	-20,054
20	1,064	1,188	-11,629	1,158	-8,828
40	2,729	2,712	0,628	2,650	2,919
50	3,699	3,595	2,815	3,515	4,967
100	9,278	8,936	3,684	8,765	5,523
200	21,975	22,996	-4,644	22,623	-2,949
250	28,688	31,275	-9,018	30,793	-7,341
300	35,550	40,220	-13,136	39,626	-11,465

Odchylka je stanovena rovnicí

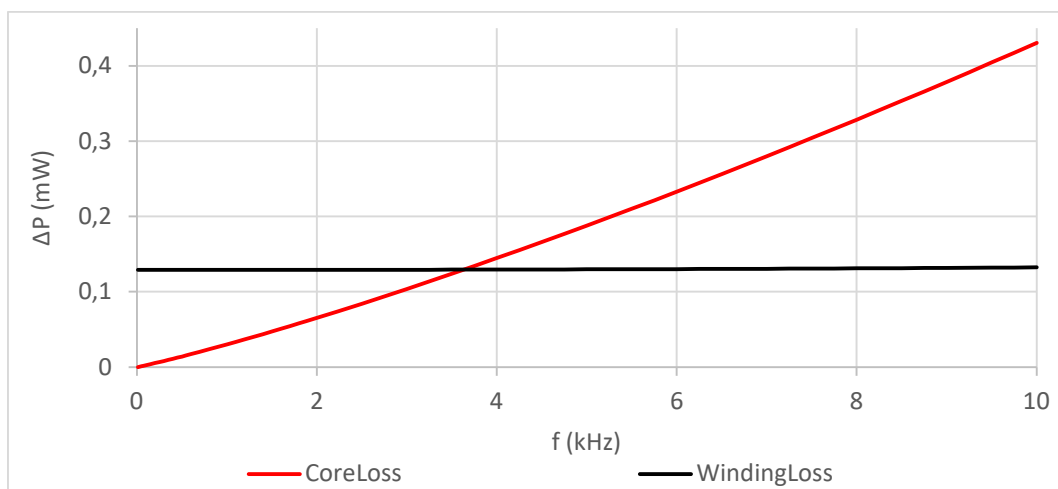
$$\Delta = 100 - \frac{\Delta P_s \cdot 100}{\Delta P_m}, \quad (3.13)$$

kde  $\Delta P_s$  jsou ztráty vypočtené simulací,  $\Delta P_m$  ztráty vypočtené z naměřených hodnot.



Obr. 71: Porovnání ztrát z měření a po druhé iteraci modelu

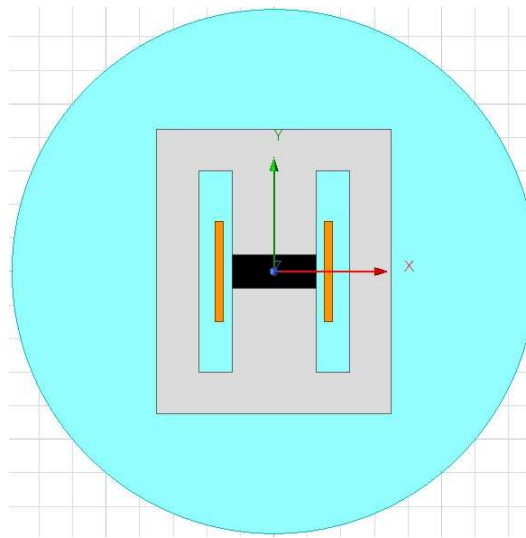
Kvůli chybě proložení a podmínce týkající se velikosti ztrát v železe je možné vyhodnocovat data z měření v rozsahu od 20 kHz do 100 kHz. Omezení rozsahu je ovlivněno nepřesnostmi proložení křivek ztrát metodou nejmenších čtverců a numerickou chybou modelu. Ztráty v železe je možné lépe popsat použitím komplexnějších rovnic z [20], které by mohly poskytnout přesnější výsledky pro frekvence nad 100 kHz. Ansys bohužel umožňuje stanovení ztrát v železe pouze Steinmetzovou rovnicí. Nepřesnost modelu by šla omezit v oblasti, kde jsou výrazné ztráty ve vinutí. Zpřesnění lze provést stanovením parametrů čel vinutí a zahrnutím jejich ztrát do výsledků modelu. V rozsahu od 10 Hz do 1 kHz lze čistě teoreticky modelem stanovit ztráty ve vinutí s relativně malou a konstantní chybou, ale pouze za předpokladu stanovení ztrát čel vinutí. Z Obr. 72 je patrné, že do frekvence 1 kHz je možné ztráty v železe zanedbat.



Obr. 72: Průběh ztrát po nastavení modelu

### 3.4 Model tlumivky

Pro ověření postupu z podkapitoly 3.3 byl vytvořen model tlumivky uvedený na Obr. 73. Model se skládá z kruhového okolí tvořeného vakuem o poloměru 155 mm. Hloubka modelu činí 20 mm. Jádru tlumivky je rozděleno na 2 části. Střed jádra tvoří objekt o rozměrech 20 x 50 mm (výška x šířka), ve kterém je dosaženo homogenního rozložení magnetické indukce. Celé jádro je vysoké 170 mm a široké 140 mm. Okrajové sloupky tlumivky jsou tlusté 25 mm. Prostor pro vinutí je tvořen mezerou o výšce 120 mm a šířce 20 mm. Vinutí je modelováno pomocí obdélníku vysokého 60 mm a širokého 5 mm. Mezi vinutím a středem jádra se nachází 5 mm široká mezera.



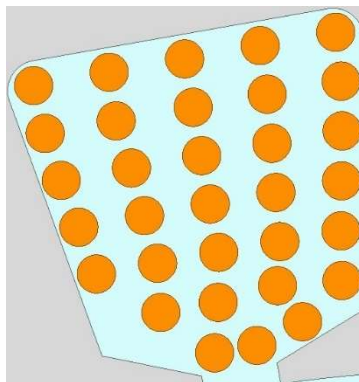
Obr. 73: Model tlumivky

Na vnější hranu vakua byl nastaven nulový potenciál. Vinutí modelu se skládá z 20 závitů napájených efektivní hodnotou sinusového proudu o velikosti 1 A. Síť eddy current modelu je tvořena elementy o velikosti 3 mm. Model počítá ztráty v železe černě zvýrazněné oblasti. Materiál jádra je nastaven jako DW540\_50 s koeficienty  $k_h = 268$  a  $k_e = 0,822$ . Relativní permeabilita železa je nastavena na hodnotu 4822,877. Vinutí je přiřazena měď z knihovny materiálů. Ve středu jádra model dosahuje magnetické indukce o velikosti 0,362 T. Objem černé části je  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$ .

Model tlumivky byl využit pouze pro ověření postupu z podkapitoly 3.3. Model počítá ztráty černě označené části jádra tlumivky, ze kterých lze uvedeným postupem dopočítat koeficienty  $k_h$  a  $k_e$  s přesností 0,02 %.

### 3.5 Výsledky měření a modelu cívky navinuté z vodiče o průměru 1,25 mm

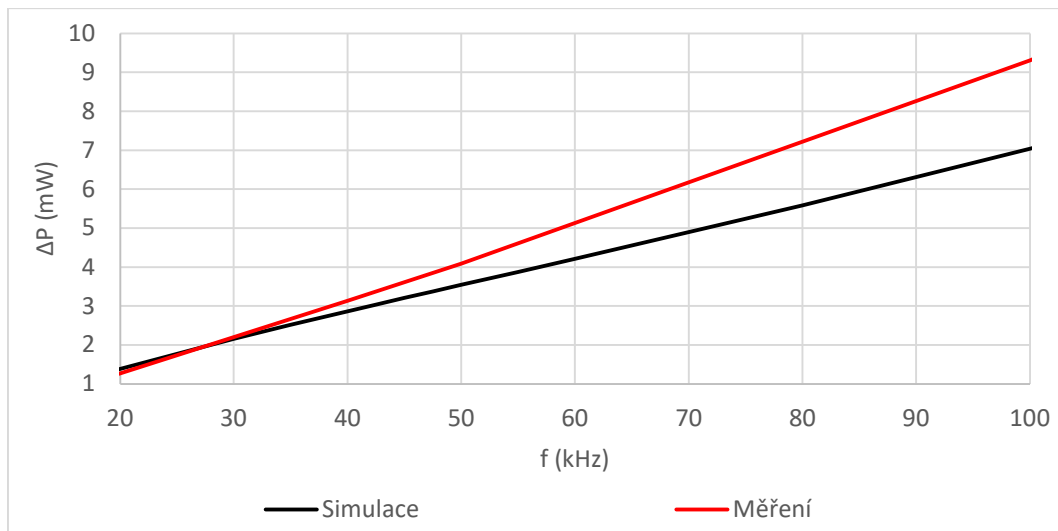
V podkapitole 2.2 je uveden výchozí model cívky navinuté z vodiče o průměru 1,25 mm. Tento model byl upraven pro porovnání výsledků modelu s naměřenými daty. Nastavení výchozího modelu bylo téměř zachováno. Úpravy modelu se týkají pouze rozvržení závitů, nastavení ztrátových koeficientů materiálu DW540\_50 a nastavením konstantní permeability statorových plechů. Materiálu je přiřazena permeabilita a nalezené ztrátové koeficienty modelu cívky z vodiče o průměru 0,35 mm. Rozvržení vodičů je znázorněno na Obr. 74. V Tab. 11 jsou uvedeny celkové ztráty zjištěné měřením a simulací spolu s odchylkou modelu. Buňky zvýrazněné šedivou barvou označují frekvenční pásmo, ve kterém model stanovuje ztráty v železe blízké realitě. Na Obr. 75 jsou uvedeny průběhy celkových ztrát.



Obr. 74: Rozložení vodičů v srovnávací simulaci

Tab. 11: Výsledky měření a simulace cívky z vodiče o průměru 1,25 mm

	<b>Měření</b>	<b>Simulace</b>	
<b><math>f</math> (kHz)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta</math> (%)</b>
0,01	0,015	0,010	31,605
0,05	0,015	0,011	26,395
0,1	0,015	0,012	19,663
1	0,020	0,036	-78,703
2	0,035	0,072	-107,000
10	0,421	0,563	-33,763
20	1,265	1,380	-9,097
40	3,137	2,866	8,636
50	4,084	3,541	13,288
100	9,308	7,035	24,426
200	21,472	15,354	28,494
250	27,963	20,087	28,165
300	34,524	25,157	27,132



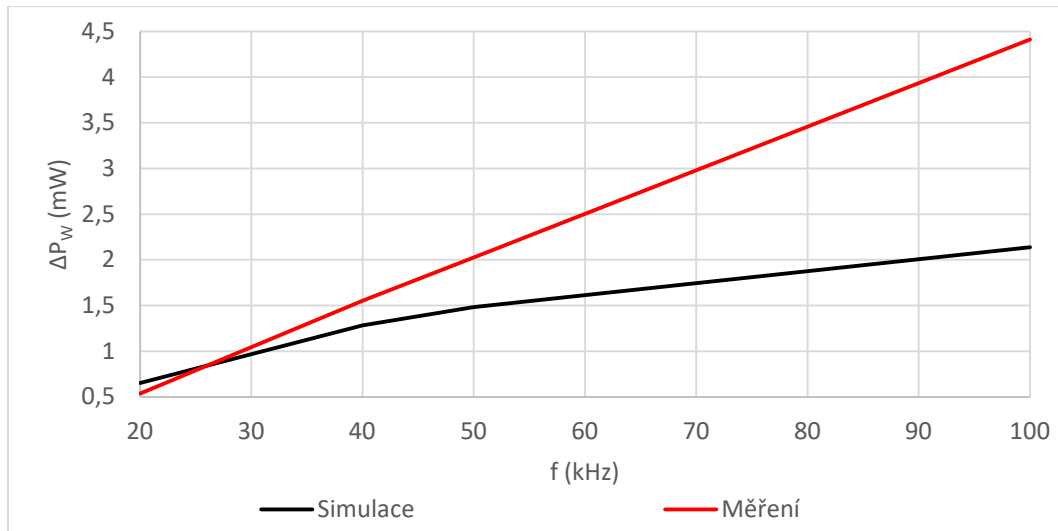
Obr. 75: Průběhy ztrát zjištěné simulací a měřením

Z uvedených výsledků je patrné, že vyhodnocení výsledků bude silně zatíženo chybou, kterou nelze odstranit. Chyba vyhodnocení výsledků je ovlivněna dlouhou řadou faktorů. Jednou z chyb je samotná chyba modelu. 2D model zanedbává čela vinutí. Model na uvedeném rozsahu frekvencí vypočítal ztráty v železe pouze 1x až 2x větší než ztráty ve vinutí. Z toho plyne, že simulací čel vinutí či výpočtem čel vinutí lze ovlivnit obdržené výsledky. Dále model přispívá přirozenou chybou plynoucí z nedodržení reálného rozložení závitů, nadhodnocením výsledných ztrát a samotnou chybou validace koeficientů Steinmetzovy rovnice. Měření také může být výrazně ovlivněno samotnou volbou měřicího vzorku, chybou měřících přístrojů či zvolenou metodikou měření.

Od celkových ztrát stanovených měření byly odečteny ztráty v železe vytvořeného modelu. Tímto postupem byly stanoveny ztráty vinutí uvedené v Tab. 12. Průběhy ztrát ve vinutí jsou uvedeny na Obr. 76.

Tab. 12: Složky celkových ztrát

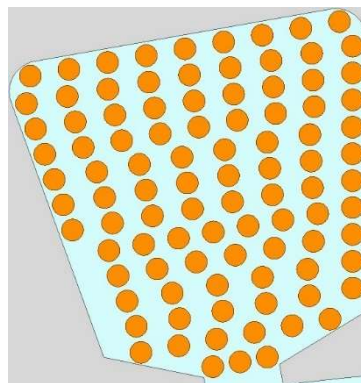
		<b>Měření</b>	<b>Simulace</b>	
<b><math>f</math> (kHz)</b>	<b><math>\Delta P_{FE}</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P_W</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P_W</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta</math> (%)</b>
20	0,725	0,540	0,655	-21,307
40	1,583	1,553	1,282	17,441
50	2,059	2,025	1,482	26,802
100	4,896	4,412	2,138	51,535



Obr. 76: Průběhy ztrát ve vinutí stanovených měřením a simulací

### 3.6 Výsledky měření a modelu cívky navinuté z vodiče o průměru 0,71 mm

Upravený model cívky vychází z modelu cívky se třemi paralelními vodiči a vertikálním tvarem závitu uvedeném v podkapitole 2.10. Model s vertikálními závity byl upraven stejným způsobem jako model cívky uvedený v předchozí kapitole. Rozložení vodičů je uvedeno na Obr. 77. V Tab. 13 jsou uvedeny celkové ztráty zjištěné měřením a simulací spolu s odchylkou modelu. Buňky zvýrazněné šedivou barvou označují frekvenční pásmo, ve kterém model stanovuje ztráty v železe blízké realitě. Obr. 78 zobrazuje průběhy celkových ztrát. Dále jsou v podkapitole uvedeny průběhy ztrát ve vinutí (Obr. 79) a tabulka hodnot ztrát ve vinutí a v železe (Tab. 14).

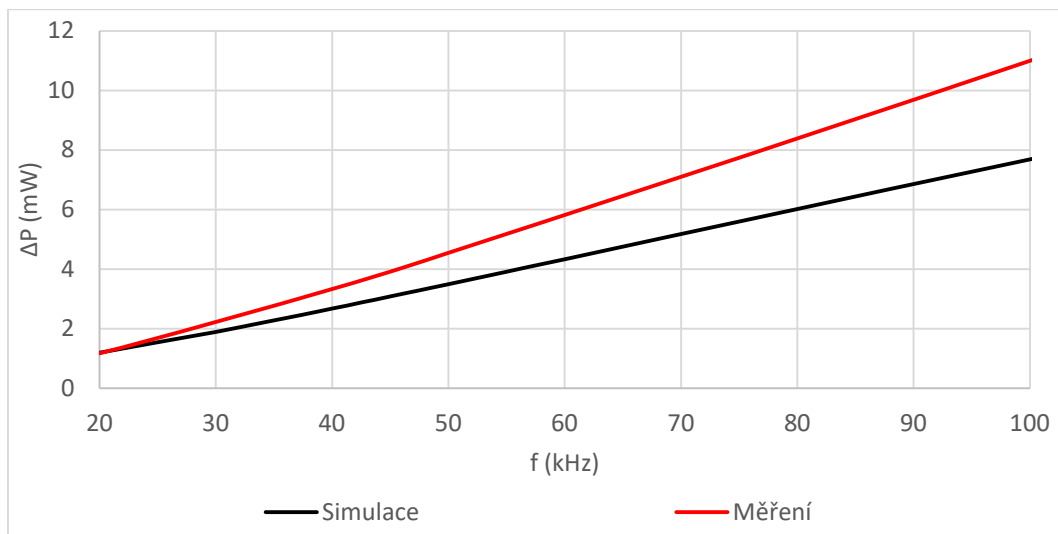


Obr. 77: Upravený model cívky s vertikálními závity



Tab. 13: Ztráty cívky s  $n_p = 3$  zaznamenané simulací a měřením

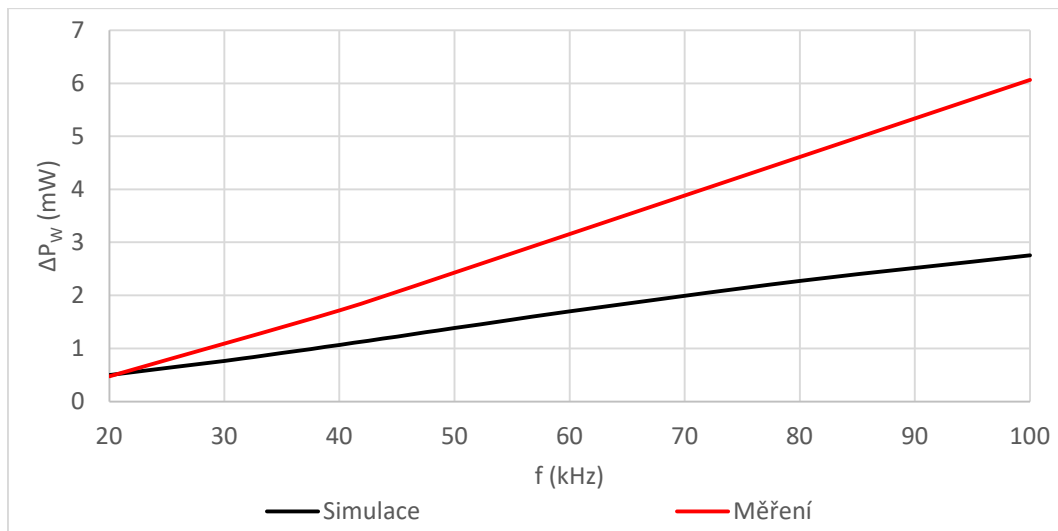
	<b>Měření</b>	<b>Simulace</b>	
<b><math>f</math> (kHz)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta</math> (%)</b>
0,01	0,015	0,011	27,428
0,05	0,015	0,011	21,880
0,1	0,015	0,013	14,689
1	0,019	0,039	-101,310
2	0,032	0,081	-148,563
10	0,376	0,560	-48,949
20	1,170	1,191	-1,818
40	3,330	2,677	19,607
50	4,545	3,498	23,029
100	11,003	7,693	30,084
200	24,255	16,227	33,098
250	30,803	20,876	32,226
300	37,215	25,829	30,596



Obr. 78: Ztráty navinuté cívky v porovnání se ztrátami simulace

Tab. 14: Složky celkových ztrát cívky s  $n_p = 3$ 

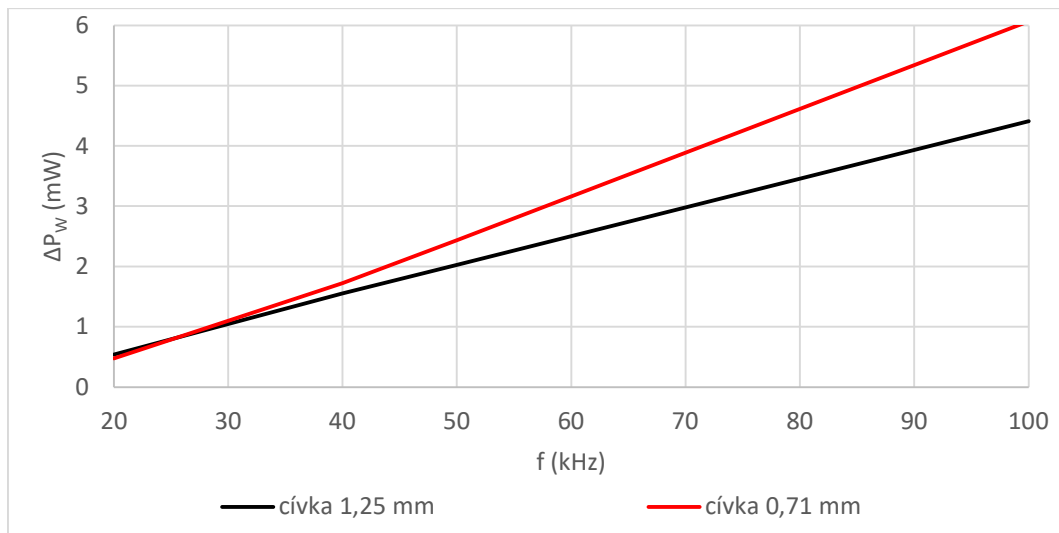
		<b>Měření</b>	<b>Simulace</b>	
<b><math>f</math> (kHz)</b>	<b><math>\Delta P_{FE}</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P_W</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta P_W</math> (mW)</b>	<b><math>\Delta</math> (%)</b>
20	0,694	0,476	0,497	-4,468
40	1,608	1,722	1,069	37,918
50	2,112	2,433	1,386	43,023
100	4,934	6,068	2,758	54,547

Obr. 79: Průběhy ztrát ve vinutí cívky s  $n_p = 3$ 

Prezentovaná data jsou zatížena podobnou chybou jako data předchozí podkapitoly a modely opět neodpovídají naměřeným datům. Zde je však nutné podotknout, že chyba modelu cívky s  $n_p = 3$  je výraznější než v případě předchozího modelu s  $n_p = 1$ . Model cívky s  $n_p = 3$  je kromě nepřesného rozložení závitů také výrazně ovlivněn tvarem navinutých závitů, které v procesu navíjení nelze kontrolovat. Tvar závitů v modelu byl nastaven na základě odhadu založeném na procesu navíjení cívky, kdy byly závity navíjeny ve vertikální poloze vodičů. Při procesu navíjení však vodiče mění svou pozici, mají tendenci propadávat mezi již navinuté závity či způsobují posun navinutých vodičů. K tomuto jevu dochází zejména vlivem utahování vodičů.

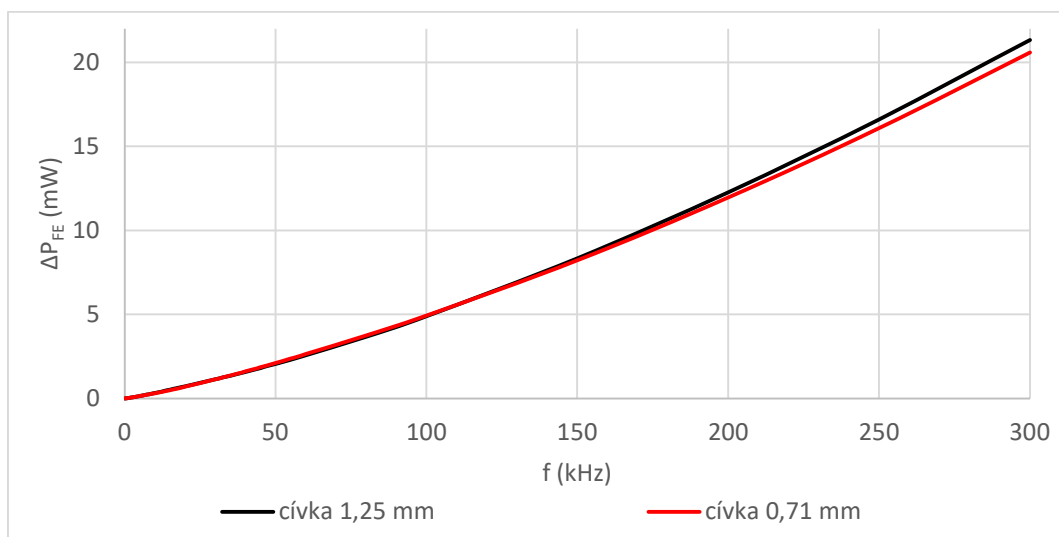
### 3.7 Srovnání upravených modelů cívek a dat z měření

Upravené modely cívek z vodičů o průměru 1,25 mm a 0,71 mm vykazují podobné chování jako modely zveřejněné v podkapitole 2.8. Upravený model cívky z vodiče 0,71 mm vykazuje nižší ztráty ve vinutí v rozmezí od 12 kHz do 55 kHz. Data získaná z měření vlivem různých nepřesností vykazují nižší ztráty ve vinutí pouze při změřené frekvenci 20 kHz. Dle vynesené grafické závislosti na Obr. 80 by měla cívka z vodiče 0,71 mm omezovat ztráty ve vinutí přibližně do frekvence 30 kHz.



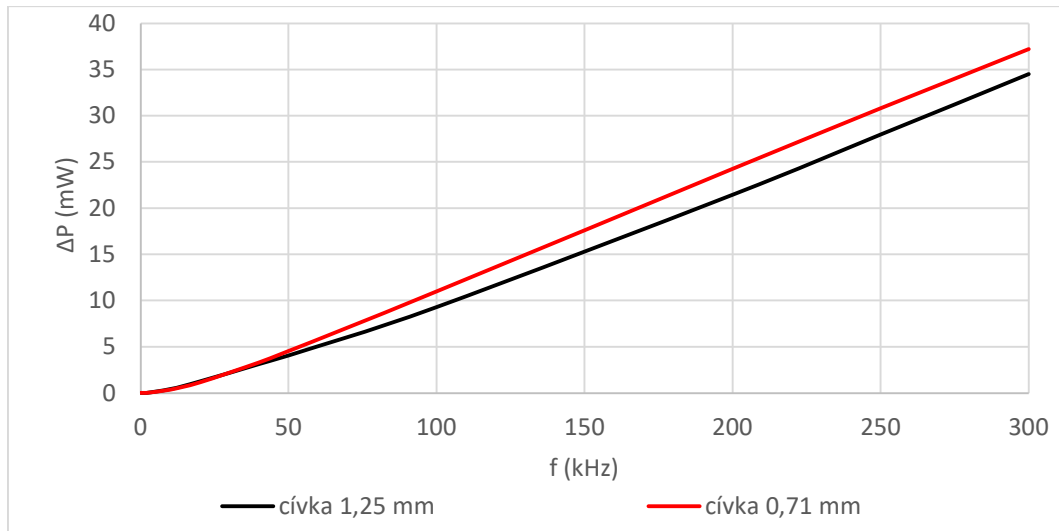
Obr. 80: Průběh ztrát ve vinutí navinutých cívek

Ztráty v železe jsou stanoveny pouze pomocí modelů. Oba modely vykazují téměř shodné ztráty v železe, které jsou zobrazeny na Obr. 81. Odchylna ztrát v železe obou modelů se pohybuje v rozmezí od -3 % do 6 %. Model cívky s  $n_p = 3$  vykazuje nižší ztráty v železe v rozmezí od 3 kHz do 32,5 kHz a od 150 kHz do 300 kHz. Nejvyšší zaznamenaná redukce ztrát v železe činí 6 %.

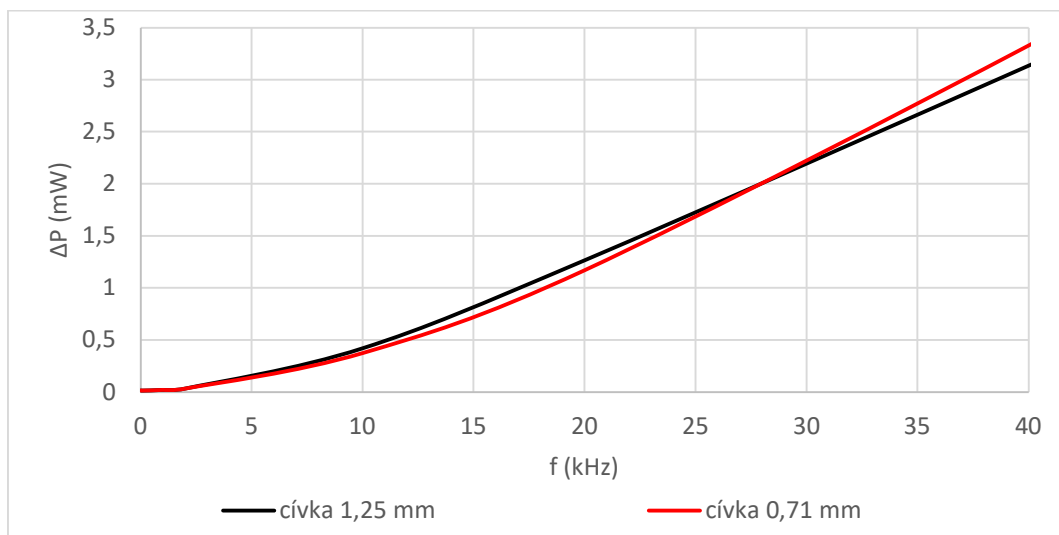


Obr. 81: Průběhy ztrát v železe navinutých konfigurací

Z hlediska celkových ztrát model cívky s  $n_p = 3$  vykazuje redukci ztrát v rozmezí od 10 kHz do 50 kHz. Data z měření vykazují redukci celkových ztrát v rozmezí od 10 Hz do přibližně 30 kHz. Modely obou cívek vykazují nižší celkové ztráty než měření. Tento fakt byl uveden v předchozích podkapitolách. Průběh celkových ztrát stanovených měřením je uveden na Obr. 82 a Obr. 83.

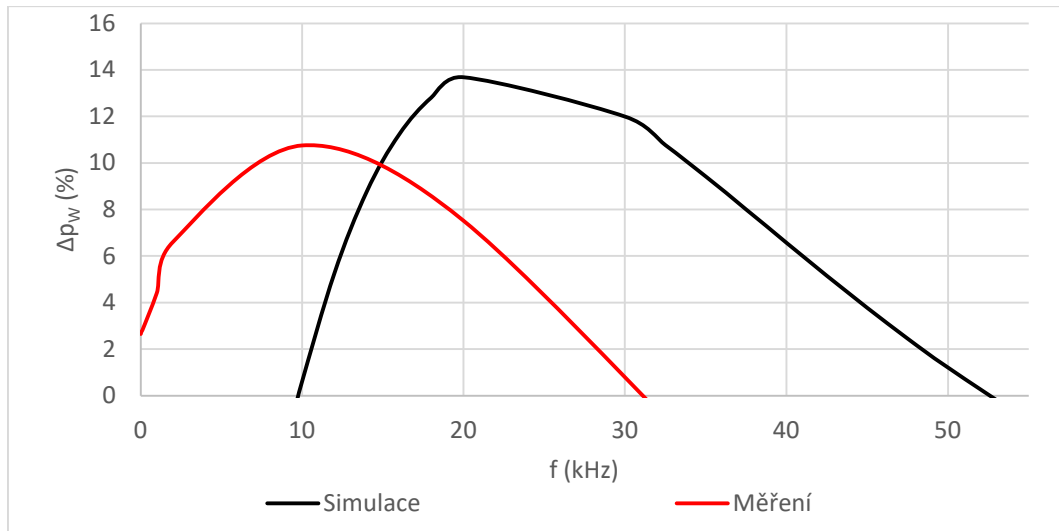


Obr. 82: Průběh celkových ztrát stanovených měřením



Obr. 83: Detail průběhu celkových ztrát stanovených měřením

Model upravené cívky s  $n_p = 3$  dosahuje maximální redukce celkových ztrát 13,6 % při frekvenci 20 kHz. Měřená cívka vykazuje nejvyšší omezení celkových ztrát při frekvenci 10 kHz, kdy dochází k redukci ztrát o 10,8 %. Průběh redukce ztrát modelu a měření je uveden na Obr. 84.

Obr. 84: Redukce ztrát modelu a měřené cívky s  $n_p = 3$ 

I přes uvedené chyby měření a modelů bylo prokázáno, že skutečně dochází k redukci ztrát při použití většího počtu paralelních větví. Model i měření vykazují podobné hodnoty redukce celkových ztrát generovaných vinutím. K redukci však dochází při jiných frekvencích. Data měření kromě uvedených chyb jsou také ovlivněna malým množstvím měřících bodů, což je patrné z vynesných grafů. Tento fakt způsobil použitý LRC metr, který při nastavení frekvence mimo předvolené hodnoty vykazoval velkou chybu měření.

## Zhodnocení a závěr

Cílem práce byl výzkum zaměřený na redukci ztrát ve vinutí realizovaný konstrukčními úpravami vinutí. Práce obsahuje rešerši zaměřenou zejména na možnosti redukce ztrát ve vinutí. Součástí rešerše je i popis metod analýzy ztrát ve vinutí. V praktické části práce je uveden popis zvoleného magnetického obvodu a navržených konfigurací cívek zubového vinutí. V celé práci se vyskytuje 29 různých modelů, které se zabývají modelováním a redukcí ztrát ve vinutí. Redukce ztrát byla v modelech provedena celkem pěti odlišnými úpravami vinutí. Ke všem vytvořeným modelům je v práci uvedeno nastavení modelů, diskuse výsledků a ilustrace výsledků či modelů. Dále byly navinuty a LRC metrem změřeny čtyři cívky lišící se počtem paralelních vodičů a průměrem použitého vodiče. V práci je také uveden způsob validace koeficientů Steinmetzovy rovnice neznámého materiálu a postup nastavení modelů navinutých cívek. Závěr práce obsahuje diskusi výsledků měření a modelů navinutých konfigurací. Veškeré modely popsané v této práci byly vytvořeny simulačním softwaru Ansys. Vzorek statoru s navinutými cívkami bude v budoucnu využit pro výuku laboratorních cvičení.

Simulace ztrát ve vinutí vyžadují tvorbu detailních modelů. Modely je nutné zjednodušovat pro dosažení optimálního času výpočtu a snížení HW nároků. Doba výpočtu simulací jednoduchých modelů může i na výkonných sestavách trvat několik hodin. Zároveň je tvorba modelů velmi časově náročná. Pro úsporu času je vhodné používat skripty, které vytvoří potřebné modely. Pro potřeby experimentů je vhodné simulovat modely s co nejmenším počtem objektů při použití Eddy Current řešiče. Více detailní modely či modely s rotorem doporučuji používat až ve finálních částech vývoje či experimentů. Výrazné urychlení výpočtů mohou nabídnout hybridní modely, které nebyly v práci použity.

Ztráty ve vinutí se projevují nelineárním rozložením proudové hustoty v závitech. Ztráty ovlivňuje velkou měrou rozptylový magnetický tok, který způsobuje v zasažených závitech růst amplitudy magnetické indukce. Růst magnetické indukce v závitech se projeví navýšením ztrát. Modely prokázaly, že ztráty ve vinutí nejvíce generují vodiče v blízkosti otevření drážky. Provedené úpravy vinutí budou v této oblasti nejvíce účinné. Směrem ke dnu drážky úpravy vinutí přestávají redukovat ztráty a mohou i ztráty navyšovat. Uvedený problém lze vyřešit aplikací hybridních cívek, které využívají různě konstruované závitky k dosažení minimálních ztrát.

Konstrukční úpravy vinutí v případě tenkých vodičů neomezují ztráty ve vinutí až do frekvence 2 kHz. Zároveň úpravy vinutí navyšují ztráty v železe v řádu jednotek procent.

Ze všech testovaných úprav vinutí vykazují nejvyšší redukci ztrát Litz wire konfigurace, které dokázaly omezit ztráty až o 90 %. Uvedené řešení je nákladné a nebude vhodné pro hromadnou výrobu. Druhou nejvyšší redukci ztrát vykazuje změna počtu paralelních větví, kterou bylo dosaženo až 59 % redukce ztrát. Výsledky provedené úpravy silně ovlivňuje tvar závitů, který nelze při navíjení kontrolovat. Tvar závitů může i ovlivnit frekvenční oblast, ve které budou ztráty redukovány. Tento fakt pravděpodobně ovlivnil výsledky měření.

Vodiče v trojúhelníkovém uspořádání jsou nejvhodnější konfigurací ze všech testovaných tvarů závitů, které navýší redukci ztrát o 15 %. Obdobných výsledků dosáhlo horizontální uspořádání závitů, které navýšilo redukci ztrát o 14 %, ale s rostoucí frekvencí redukce klesala. Vertikální uspořádání závitů je nejméně vhodné, neboť výrazně zvyšuje generované ztráty při nízkých frekvencích. Efekt redukce ztrát se při vertikálním uspořádání objeví až při vysoké frekvenci. Paralelní vodiče je možné v modelech nahrazovat vodičem ekvivalentního průřezu, ale modely budou poskytovat přesné výsledky ve výrazně omezeném pásmu frekvencí.

Slušné výsledky poskytlo odsunutí vinutí od otevření drážky, které je možné aplikovat při nižších hodnotách plnění drážky. Úprava je závislá na počtu odsunutých vrstev vinutí a je nutné ji simulovat, aby nedocházelo k navýšení ztrát. Uvedeným postupem bylo docíleno až 55 % redukce ztrát. Kvůli nepředvídatelným výsledkům ručního navíjení nevznikl pro danou úpravu vzorek cívky.

Nejnižší redukce ztrát byla zaznamenána při změně materiálu vinutí, kdy byly ztráty omezeny maximálně o 25 %. Použití hliníkových závitů neovlivnilo ztráty v železe a zároveň by poskytlo redukci hmotnosti. Vzorek hliníkové cívky nebyl navinut kvůli absenci vhodného materiálu.

V závěru práce jsou uvedeny informace z měření navinutých vzorků. V případě cívky s  $n_p = 3$  skutečně došlo k redukci celkových ztrát. Výsledky měření a postup vyhodnocení výsledků je zatížen velikou chybou. Chyba vyhodnocení vyplývá z nepřesnosti 2D modelů, postupu stanovení koeficientů Steinmetzovy rovnice či ze samotného měření. Kvůli chybám a omezeným možnostem modelů nelze výsledky adekvátně porovnat. Ztráty ve vinutí stanovené z měření se od výsledků modelů liší v rozmezí od 20 % do 50 %.

Použitý LRC metr umožňoval přesné měření pouze pro malé množství frekvencí. Lepších výsledků měření by bylo nejspíše možné dosáhnout použitím sinusového generátoru a přímým měřením ztrát navinutých cívek při konstantním proudu. Volba statorového paketu také nepřispěla k výsledkům měření. Ztráty statorového paketu nešly změřit pomocí Epsteinova rámu a bylo nutné použít experimentální metodu popsanou v kapitole č. 3, kterou lze přibližně stanovit ztrátové koeficienty použitého materiálu. Pro lepší stanovení ztrát v železe by bylo potřeba objednat nový statorový paket spolu s nastříhanými železnými pásy, které by se použily pro měření ztrát v železe. Alternativní variantou je použití transformátorových plechů nastříhaných do tvaru E, ze kterých by byla poskládána kostra pro měření cívek.

Efekt omezení ztrát zkoumaných úprav je silně proměnlivý v oblasti od 10 Hz do 10 kHz. Při frekvenci 10 kHz úpravy dosahovaly maximálních či ustálených hodnot redukce ztrát. Pásmo frekvencí od 10 Hz do 10 kHz je z hlediska provozu trakčních strojů či vysokootáčkových strojů nejdůležitější. V této oblasti se pohybuje pracovní harmonická motorů a zároveň nejnižší řády harmonických složek zanesených do stroje spínací frekvencí měniče. Provedenými úpravami lze omezit ztráty pracovní harmonické i ztráty způsobené harmonickými vyšších řádů.

Pro laboratorní cvičení, která by využívala vytvořený vzorek k výuce doporučuji měření celkových ztrát cívek navinutých z vodiče 1,25 mm a 0,71 mm do frekvence 40 kHz. Tím bude změřena oblast, při které je dosaženo redukce ztrát. U obou cívek je zbytečné provádět rozklad celkových ztrát na složky. V případě měření cívek z vodiče 0,35 mm je možné stanovit měřením ztráty ve vinutí do frekvence 2 kHz. Při použití modelu cívky by bylo možné provádět měření až do frekvence 100 kHz. Model cívky by byl následně využit pro rozklad celkových ztrát na ztráty v železe a ve vinutí.

Téma redukce ztrát ve vinutí nabízí zajímavé možnosti k dalšímu výzkumu. Slibnou oblastí může být 3D tisk vinutí nebo výzkum hybridních cívek. Poznatky získané v oblasti redukce ztrát vinutí zatím nejsou zahrnuty do návrhu elektrických strojů. Vývoj návrhů zahrnujících metody redukce ztrát ve vinutí může do budoucna poskytnout technologickou výhodu na trhu. Stroje s redukovánými ztrátami mohou dosahovat vyšších výkonových hustot nebo mohou nabízet méně ekonomicky náročný provoz. Uvedené úpravy budou značně prodražovat výrobu a jejich aplikace nebude vhodná pro průmyslové stroje. Možnou aplikaci strojů s redukovánými ztrátami lze hledat v oblasti letectví, trakce, automobilového průmyslu či vojenství. Nejpravděpodobnější aplikaci uvedených úprav bude možné najít při návrhu vysokootáčkových motorů či speciálních strojů.



## Literatura

- [1] S. Iwasaki, R. P. Deodhar, Y. Liu, A. Pride, Z. Q. Zhu and J. J. Bremner, "Influence of PWM on the Proximity Loss in Permanent-Magnet Brushless AC Machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 4, pp. 1359-1367, July-aug. 2009, doi: 10.1109/TIA.2009.2023488.
- [2] A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant, "Mitigation of High-Frequency Eddy Current Losses in Hairpin Winding Machines." *Machines* **2022**, 10, 328. <https://doi.org/10.3390/machines10050328>
- [3] H. A. Wheeler, "Formulas for the Skin Effect," in Proceedings of the IRE, vol. 30, no. 9, pp. 412-424, Sept. 1942, doi: 10.1109/JRPROC.1942.232015. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1694542>
- [4] P. Mellor, R. Wrobel and N. Simpson, "AC losses in high frequency electrical machine windings formed from large section conductors," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 5563-5570, doi: 10.1109/ECCE.2014.6954163. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6954163>
- [5] A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant. "Development of Novel Semi-Stranded Windings for High Speed Electrical Machines Enabled by Additive Manufacturing." *Appl. Sci.* **2023**, 13, 1653. <https://doi.org/10.3390/app13031653>
- [6] A. Selema, M.N. Ibrahim, P. Sergeant. "Electrical Machines Winding Technology: Latest Advancements for Transportation Electrification." *Machines* **2022**, 10, 563. <https://doi.org/10.3390/machines10070563>
- [7] A. Hebala, S. Nuzzo, P.H. Connor, G. Volpe, C. Gerada, M. Galea. "Analysis and Mitigation of AC Losses in High Performance Propulsion Motors." *Machines* **2022**, 10, 780. <https://doi.org/10.3390/machines10090780>
- [8] A. Selema, M. Gulec, M. N. Ibrahim, R. Sprangers and P. Sergeant, "Selection of Magnet Wire Topologies With Reduced AC Losses for the Windings of Electric Drivetrains," in IEEE Access, vol. 10, pp. 121531-121546, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3222773.
- [9] A. Bardalai, D. Gerada, T. Zou, M. Degano, C. Zhang, C. Gerada. "Comparison of AC Losses in the Winding of Electrical Machines with Fixed Strands Positions, Fixed Conductor Shapes and Random Winding." *Energies* **2022**, 15, 5701. <https://doi.org/10.3390/en15155701>
- [10] Z. Frank. "Vícefázové elektrické stroje", Teze disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Plzeň 2023
- [11] J. PYRHÖNEN, T. JOKINEN, V. HRABOVCOVÁ. "Design of rotating electrical machines." 2nd edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [12] K. Hruška. "Ztráty v elektrických strojích." Přednáška z předmětu SST1. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Plzeň 2023
- [13] J. Novák, M. Novák, J. Chyský. "Řízení vysokootáčkových synchronních strojů (1. část)." *Časopis Elektro*, č.6, 2011, <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/rizeni-vysokootackovych-synchronnich-stroju-1-cast--9940>
- [14] Q. Gao, et al.: "Copper loss analysis and loss separation method in a dynamic process of ultra-high speed motor with slotless stator." *IET Electr. Power Appl.* 17(4), 464–473, 2023. <https://doi.org/10.1049/elp2.12278>
- [15] G. Volpe, M. Popescu, F. Marignetti and J. Goss, "Modelling AC Winding Losses in a PMSM with High Frequency and Torque Density," 2018 IEEE Energy Conversion

- Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 2018, pp. 2300-2305, doi: 10.1109/ECCE.2018.8558065. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8558065>
- [16] Eloxování hliníku. <https://www.astronom.cz/procyon/chemistry/elox.html>
- [17] N. Taran and D. M. Ionel, "A Hybrid Analytical and FE-based Method for Calculating AC Eddy Current Winding Losses Taking 3D Effects into Account," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 4867-4872, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912784.
- [18] A. Selema, K.B. Tawfiq, M.N. Ibrahim, P. Sergeant. "Winding Loss Suppression in Inverter-Fed Traction Motors via Hybrid Coil Materials and Configurations." *Appl. Sci.* **2023**, 13, 11429. <https://doi.org/10.3390/app132011429>
- [19] M. Kára. "Magnetická měření materiálů pro elektrotechniku." Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Plzeň 1982
- [20] A. Klein-Hessling, B. Burkhart and R. W. De Doncker, "Iron loss redistribution in Switched Reluctance Machines using bidirectional phase currents," 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2016.0219.

## Přílohy

### Příloha 1. – Vliv zjednodušení modelu na velikost ztrát

Transient s rotorem		
$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	4,473E-01	2,000E-04
0,05	4,476E-01	1,000E-03
0,1	4,484E-01	2,400E-03
0,2	4,581E-01	6,400E-03
0,3	4,577E-01	1,190E-02
0,4	4,665E-01	1,890E-02
0,5	4,786E-01	2,750E-02
0,6	4,944E-01	3,770E-02
0,8	5,393E-01	6,260E-02
1	6,042E-01	9,390E-02
1,2	6,907E-01	1,313E-01
1,4	7,986E-01	1,749E-01
1,6	9,270E-01	2,248E-01
1,8	1,074E+00	2,810E-01
2	1,239E+00	3,433E-01
2,5	1,718E+00	5,265E-01
3	2,279E+00	7,486E-01
3,5	2,905E+00	1,010E+00
4	3,588E+00	1,310E+00
4,5	4,316E+00	1,649E+00
5	5,085E+00	2,027E+00
6	6,719E+00	2,900E+00
7	8,457E+00	3,930E+00
8	1,027E+01	5,115E+00
9	1,215E+01	6,458E+00
10	1,408E+01	7,957E+00
12	1,804E+01	1,142E+01
14	2,207E+01	1,552E+01
16	2,611E+01	2,025E+01
18	3,011E+01	2,560E+01
20	3,404E+01	3,158E+01

Transient 3 fáze			Eddy Current 3 fáze		
$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	4,473E-01	8,000E-04	0,01	3,652E-01	8,589E-04
0,05	4,474E-01	4,300E-03	0,05	3,653E-01	4,805E-03
0,1	4,475E-01	9,800E-03	0,1	3,656E-01	1,089E-02
0,2	4,482E-01	2,450E-02	0,2	3,668E-01	2,689E-02
0,3	4,493E-01	4,430E-02	0,3	3,688E-01	4,800E-02
0,4	4,508E-01	6,900E-02	0,4	3,716E-01	7,422E-02
0,5	4,529E-01	9,890E-02	0,5	3,752E-01	1,056E-01
0,6	4,554E-01	1,338E-01	0,6	3,796E-01	1,420E-01
0,8	4,619E-01	2,187E-01	0,8	3,907E-01	2,302E-01
1	4,706E-01	3,239E-01	1	4,051E-01	3,388E-01
1,2	4,818E-01	4,493E-01	1,2	4,226E-01	4,679E-01
1,4	4,956E-01	5,949E-01	1,4	4,433E-01	6,174E-01
1,6	5,122E-01	7,608E-01	1,6	4,671E-01	7,872E-01
1,8	5,319E-01	9,468E-01	1,8	4,940E-01	9,774E-01
2	5,549E-01	1,153E+00	2	5,241E-01	1,188E+00
2,5	6,275E-01	1,756E+00	2,5	6,128E-01	1,803E+00
3	7,227E-01	2,485E+00	3	7,204E-01	2,545E+00
3,5	8,405E-01	3,339E+00	3,5	8,466E-01	3,414E+00
4	9,803E-01	4,317E+00	4	9,910E-01	4,408E+00
4,5	1,141E+00	5,419E+00	4,5	1,153E+00	5,527E+00
5	1,321E+00	6,644E+00	5	1,332E+00	6,771E+00
6	1,734E+00	9,460E+00	6	1,738E+00	9,630E+00
7	2,211E+00	1,276E+01	7	2,203E+00	1,298E+01
8	2,743E+00	1,654E+01	8	2,723E+00	1,681E+01
9	3,322E+00	2,079E+01	9	3,289E+00	2,112E+01
10	3,941E+00	2,550E+01	10	3,897E+00	2,590E+01
12	5,270E+00	3,630E+01	12	5,209E+00	3,684E+01
14	6,682E+00	4,888E+01	14	6,611E+00	4,958E+01
16	8,137E+00	6,321E+01	16	8,062E+00	6,407E+01
18	9,603E+00	7,926E+01	18	9,528E+00	8,028E+01
20	1,106E+01	9,700E+01	20	1,098E+01	9,818E+01

Transient 1 fáze			Eddy Current 1 fáze		
$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	4,473E-01	2,000E-04	0,01	3,652E-01	1,915E-04
0,05	4,473E-01	1,100E-03	0,05	3,652E-01	1,071E-03
0,1	4,474E-01	2,600E-03	0,1	3,654E-01	2,427E-03
0,2	4,477E-01	6,500E-03	0,2	3,660E-01	5,994E-03
0,3	4,481E-01	1,180E-02	0,3	3,671E-01	1,070E-02
0,4	4,487E-01	1,850E-02	0,4	3,686E-01	1,655E-02
0,5	4,495E-01	2,650E-02	0,5	3,706E-01	2,353E-02
0,6	4,506E-01	3,610E-02	0,6	3,729E-01	3,166E-02
0,8	4,532E-01	5,920E-02	0,8	3,790E-01	5,132E-02
1	4,568E-01	8,780E-02	1	3,867E-01	7,554E-02
1,2	4,614E-01	1,221E-01	1,2	3,961E-01	1,043E-01
1,4	4,671E-01	1,619E-01	1,4	4,073E-01	1,376E-01
1,6	4,741E-01	2,072E-01	1,6	4,201E-01	1,755E-01
1,8	4,825E-01	2,581E-01	1,8	4,347E-01	2,179E-01
2	4,925E-01	3,146E-01	2	4,509E-01	2,649E-01
2,5	5,249E-01	4,799E-01	2,5	4,987E-01	4,022E-01
3	5,695E-01	6,798E-01	3	5,568E-01	5,678E-01
3,5	6,275E-01	9,141E-01	3,5	6,248E-01	7,617E-01
4	6,992E-01	1,183E+00	4	7,027E-01	9,838E-01
4,5	7,844E-01	1,486E+00	4,5	7,900E-01	1,234E+00
5	8,826E-01	1,823E+00	5	8,865E-01	1,512E+00
6	1,115E+00	2,598E+00	6	1,105E+00	2,152E+00
7	1,389E+00	3,508E+00	7	1,357E+00	2,903E+00
8	1,699E+00	4,551E+00	8	1,637E+00	3,764E+00
9	2,039E+00	5,727E+00	9	1,943E+00	4,733E+00
10	2,404E+00	7,034E+00	10	2,271E+00	5,810E+00
12	3,192E+00	1,004E+01	12	2,981E+00	8,284E+00
14	4,032E+00	1,355E+01	14	3,742E+00	1,118E+01
16	4,901E+00	1,756E+01	16	4,532E+00	1,448E+01
18	5,778E+00	2,208E+01	18	5,334E+00	1,819E+01
20	6,651E+00	2,708E+01	20	6,134E+00	2,231E+01

## Příloha 2. – Ztráty jednovrstvého a dvouvrstvého vinutí

2 vrstvé vinutí				1 vrstvé vinutí			
$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W/\Delta P_{FE}$	$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W/\Delta P_{FE}$
0,01	3,246E-01	1,517E-07	2,139E+03	0,01	6,492E-01	5,740E-07	1,131E+03
0,05	3,247E-01	8,490E-07	3,824E+02	0,05	6,495E-01	3,212E-06	2,022E+02
0,1	3,248E-01	1,924E-06	1,688E+02	0,1	6,504E-01	7,277E-06	8,938E+01
0,2	3,252E-01	4,750E-06	6,847E+01	0,2	6,539E-01	1,797E-05	3,639E+01
0,3	3,260E-01	8,480E-06	3,845E+01	0,3	6,598E-01	3,208E-05	2,057E+01
0,4	3,271E-01	1,311E-05	2,495E+01	0,4	6,681E-01	4,960E-05	1,347E+01
0,5	3,286E-01	1,865E-05	1,762E+01	0,5	6,787E-01	7,054E-05	9,621E+00
0,6	3,303E-01	2,509E-05	1,317E+01	0,6	6,917E-01	9,490E-05	7,289E+00
0,8	3,347E-01	4,067E-05	8,230E+00	0,8	7,247E-01	1,538E-04	4,710E+00
1	3,404E-01	5,987E-05	5,686E+00	1	7,670E-01	2,264E-04	3,387E+00
1,2	3,474E-01	8,267E-05	4,202E+00	1,2	8,187E-01	3,127E-04	2,619E+00
1,4	3,556E-01	1,091E-04	3,260E+00	1,4	8,798E-01	4,125E-04	2,133E+00
1,6	3,650E-01	1,391E-04	2,624E+00	1,6	9,501E-01	5,260E-04	1,806E+00
1,8	3,757E-01	1,727E-04	2,175E+00	1,8	1,030E+00	6,530E-04	1,577E+00
2	3,876E-01	2,099E-04	1,846E+00	2	1,118E+00	7,937E-04	1,409E+00
2,5	4,228E-01	3,188E-04	1,326E+00	2,5	1,380E+00	1,204E-03	1,146E+00
3	4,655E-01	4,500E-04	1,034E+00	3	1,697E+00	1,700E-03	9,984E-01
3,5	5,157E-01	6,037E-04	8,541E-01	3,5	2,069E+00	2,279E-03	9,077E-01
4	5,730E-01	7,798E-04	7,348E-01	4	2,493E+00	2,941E-03	8,476E-01
4,5	6,373E-01	9,781E-04	6,516E-01	4,5	2,969E+00	3,687E-03	8,052E-01
5	7,085E-01	1,199E-03	5,911E-01	5	3,493E+00	4,515E-03	7,738E-01
5,5	7,862E-01	1,441E-03	5,454E-01	5,5	4,065E+00	5,424E-03	7,495E-01
6	8,702E-01	1,706E-03	5,100E-01	6	4,682E+00	6,415E-03	7,299E-01
6,5	9,603E-01	1,993E-03	4,818E-01	6,5	5,342E+00	7,485E-03	7,136E-01
7	1,056E+00	2,302E-03	4,588E-01	7	6,041E+00	8,636E-03	6,996E-01
7,5	1,157E+00	2,632E-03	4,396E-01	7,5	6,779E+00	9,865E-03	6,872E-01
8	1,264E+00	2,985E-03	4,234E-01	8	7,551E+00	1,117E-02	6,760E-01
8,5	1,375E+00	3,359E-03	4,094E-01	8,5	8,357E+00	1,256E-02	6,656E-01
9	1,491E+00	3,754E-03	3,972E-01	9	9,193E+00	1,402E-02	6,559E-01
9,5	1,611E+00	4,171E-03	3,863E-01	9,5	1,006E+01	1,555E-02	6,466E-01
10	1,735E+00	4,610E-03	3,765E-01	10	1,095E+01	1,716E-02	6,377E-01
12	2,266E+00	6,575E-03	3,447E-01	12	1,471E+01	2,434E-02	6,042E-01
14	2,838E+00	8,875E-03	3,198E-01	14	1,869E+01	3,265E-02	5,724E-01
16	3,436E+00	1,150E-02	2,987E-01	16	2,277E+01	4,205E-02	5,414E-01

2 vrstvé vinutí				1 vrstvé vinutí			
$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W/\Delta P_{FE}$	$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W/\Delta P_{FE}$
18	4,046E+00	1,446E-02	2,798E-01	18	2,686E+01	5,252E-02	5,113E-01
20	4,658E+00	1,773E-02	2,627E-01	20	3,087E+01	6,403E-02	4,822E-01
30	7,538E+00	3,882E-02	1,942E-01	30	4,873E+01	1,366E-01	3,568E-01
32,5	8,185E+00	4,531E-02	1,806E-01	32,5	5,253E+01	1,586E-01	3,312E-01
35	8,799E+00	5,229E-02	1,683E-01	35	5,607E+01	1,821E-01	3,079E-01
37,5	9,383E+00	5,974E-02	1,571E-01	37,5	5,938E+01	2,072E-01	2,866E-01
40	9,938E+00	6,768E-02	1,468E-01	40	6,247E+01	2,338E-01	2,672E-01
42,5	1,047E+01	7,610E-02	1,375E-01	42,5	6,538E+01	2,620E-01	2,495E-01
45	1,097E+01	8,501E-02	1,290E-01	45	6,813E+01	2,918E-01	2,335E-01
47,5	1,145E+01	9,440E-02	1,213E-01	47,5	7,072E+01	3,231E-01	2,189E-01
50	1,191E+01	1,043E-01	1,142E-01	50	7,318E+01	3,559E-01	2,056E-01
55	1,277E+01	1,255E-01	1,018E-01	55	7,777E+01	4,264E-01	1,824E-01
60	1,357E+01	1,486E-01	9,133E-02	60	8,200E+01	5,031E-01	1,630E-01
80	1,639E+01	2,606E-01	6,289E-02	80	9,669E+01	8,730E-01	1,108E-01
100	1,885E+01	4,036E-01	4,671E-02	100	1,096E+02	1,343E+00	8,155E-02
150	2,432E+01	8,960E-01	2,715E-02	150	1,383E+02	2,955E+00	4,681E-02
200	2,917E+01	1,580E+00	1,846E-02	200	1,637E+02	5,181E+00	3,160E-02
250	3,354E+01	2,455E+00	1,366E-02	250	1,865E+02	8,019E+00	2,326E-02
300	3,754E+01	3,521E+00	1,066E-02	300	2,073E+02	1,147E+01	1,808E-02

## Příloha 3. – Ztráty vinutí s provedeným odsunutím

1,25 mm	Bez odsunutí		Odsunutí o 1 vrstvu		Odsunutí o 2 vrstvy	
	$f$ (kHz)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)
0,01	6,492E-01	5,734E-07	6,492E-01	5,930E-07	6,492E-01	6,125E-07
0,05	6,495E-01	3,208E-06	6,495E-01	3,318E-06	6,494E-01	3,427E-06
0,1	6,504E-01	7,269E-06	6,501E-01	7,518E-06	6,500E-01	7,766E-06
0,2	6,539E-01	1,795E-05	6,529E-01	1,856E-05	6,522E-01	1,918E-05
0,3	6,598E-01	3,205E-05	6,575E-01	3,314E-05	6,559E-01	3,423E-05
0,4	6,681E-01	4,955E-05	6,639E-01	5,124E-05	6,611E-01	5,294E-05
0,5	6,787E-01	7,047E-05	6,721E-01	7,288E-05	6,678E-01	7,528E-05
0,6	6,917E-01	9,480E-05	6,822E-01	9,803E-05	6,759E-01	1,013E-04
0,8	7,246E-01	1,537E-04	7,078E-01	1,589E-04	6,967E-01	1,642E-04
1	7,670E-01	2,262E-04	7,407E-01	2,339E-04	7,233E-01	2,417E-04
1,2	8,187E-01	3,123E-04	7,808E-01	3,230E-04	7,558E-01	3,337E-04
1,4	8,797E-01	4,121E-04	8,281E-01	4,262E-04	7,941E-01	4,403E-04
1,6	9,500E-01	5,254E-04	8,827E-01	5,434E-04	8,383E-01	5,615E-04
1,8	1,030E+00	6,523E-04	9,443E-01	6,748E-04	8,882E-01	6,972E-04
2	1,118E+00	7,928E-04	1,013E+00	8,201E-04	9,439E-01	8,474E-04
2,5	1,380E+00	1,203E-03	1,216E+00	1,245E-03	1,108E+00	1,286E-03
3	1,697E+00	1,698E-03	1,461E+00	1,757E-03	1,306E+00	1,816E-03
3,5	2,068E+00	2,276E-03	1,749E+00	2,356E-03	1,538E+00	2,435E-03
4	2,493E+00	2,938E-03	2,076E+00	3,042E-03	1,803E+00	3,145E-03
4,5	2,968E+00	3,683E-03	2,443E+00	3,814E-03	2,099E+00	3,944E-03
5	3,493E+00	4,510E-03	2,847E+00	4,672E-03	2,424E+00	4,832E-03
5,5	4,065E+00	5,418E-03	3,287E+00	5,616E-03	2,777E+00	5,809E-03
6	4,681E+00	6,408E-03	3,760E+00	6,644E-03	3,157E+00	6,874E-03
6,5	5,341E+00	7,477E-03	4,265E+00	7,756E-03	3,562E+00	8,027E-03
7	6,040E+00	8,626E-03	4,799E+00	8,952E-03	3,989E+00	9,268E-03
7,5	6,777E+00	9,854E-03	5,361E+00	1,023E-02	4,438E+00	1,060E-02
8	7,550E+00	1,116E-02	5,949E+00	1,159E-02	4,906E+00	1,201E-02
8,5	8,355E+00	1,254E-02	6,559E+00	1,304E-02	5,392E+00	1,351E-02
9	9,191E+00	1,400E-02	7,191E+00	1,456E-02	5,894E+00	1,509E-02
9,5	1,005E+01	1,554E-02	7,843E+00	1,616E-02	6,410E+00	1,676E-02
10	1,094E+01	1,714E-02	8,511E+00	1,785E-02	6,938E+00	1,852E-02
12	1,470E+01	2,431E-02	1,132E+01	2,538E-02	9,142E+00	2,638E-02
14	1,868E+01	3,261E-02	1,425E+01	3,415E-02	1,142E+01	3,555E-02
16	2,277E+01	4,201E-02	1,721E+01	4,413E-02	1,370E+01	4,603E-02
18	2,685E+01	5,246E-02	2,014E+01	5,530E-02	1,593E+01	5,779E-02
20	3,087E+01	6,396E-02	2,298E+01	6,764E-02	1,807E+01	7,082E-02
30	4,872E+01	1,364E-01	3,516E+01	1,467E-01	2,697E+01	1,549E-01



1,25 mm <i>f</i> (kHz)	Bez odsunutí		Odsunutí o 1 vrstvu		Odsunutí o 2 vrstvy	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	5,252E+01	1,584E-01	3,766E+01	1,709E-01	2,874E+01	1,809E-01
35	5,606E+01	1,819E-01	3,997E+01	1,970E-01	3,037E+01	2,088E-01
37,5	5,937E+01	2,070E-01	4,211E+01	2,248E-01	3,186E+01	2,388E-01
40	6,247E+01	2,336E-01	4,410E+01	2,545E-01	3,325E+01	2,707E-01
42,5	6,538E+01	2,617E-01	4,595E+01	2,860E-01	3,453E+01	3,046E-01
45	6,812E+01	2,914E-01	4,769E+01	3,193E-01	3,572E+01	3,404E-01
47,5	7,071E+01	3,227E-01	4,933E+01	3,544E-01	3,685E+01	3,783E-01
50	7,317E+01	3,555E-01	5,088E+01	3,913E-01	3,791E+01	4,182E-01
55	7,776E+01	4,259E-01	5,377E+01	4,706E-01	3,987E+01	5,039E-01
60	8,199E+01	5,025E-01	5,642E+01	5,572E-01	4,168E+01	5,976E-01
80	9,668E+01	8,720E-01	6,563E+01	9,767E-01	4,797E+01	1,052E+00
100	1,095E+02	1,342E+00	7,374E+01	1,513E+00	5,353E+01	1,635E+00
150	1,383E+02	2,951E+00	9,199E+01	3,360E+00	6,609E+01	3,648E+00
200	1,637E+02	5,175E+00	1,082E+02	5,928E+00	7,722E+01	6,454E+00
250	1,865E+02	8,009E+00	1,226E+02	9,214E+00	8,716E+01	1,005E+01
300	2,073E+02	1,145E+01	1,358E+02	1,322E+01	9,620E+01	1,444E+01

1 mm	Bez odsunutí		Odsunutí o 1 vrstvu		Odsunutí o 2 vrstvy		Odsunutí o 3 vrstvy	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	1,014E+00	6,019E-07	1,014E+00	6,059E-07	1,014E+00	6,271E-07	1,014E+00	6,373E-07
0,05	1,015E+00	3,368E-06	1,015E+00	3,390E-06	1,015E+00	3,508E-06	1,015E+00	3,566E-06
0,1	1,015E+00	7,631E-06	1,015E+00	7,682E-06	1,015E+00	7,950E-06	1,015E+00	8,080E-06
0,2	1,016E+00	1,884E-05	1,016E+00	1,897E-05	1,016E+00	1,963E-05	1,016E+00	1,995E-05
0,3	1,019E+00	3,364E-05	1,019E+00	3,387E-05	1,019E+00	3,505E-05	1,018E+00	3,562E-05
0,4	1,023E+00	5,202E-05	1,022E+00	5,237E-05	1,022E+00	5,419E-05	1,021E+00	5,508E-05
0,5	1,027E+00	7,398E-05	1,027E+00	7,447E-05	1,026E+00	7,707E-05	1,025E+00	7,833E-05
0,6	1,033E+00	9,952E-05	1,033E+00	1,002E-04	1,031E+00	1,037E-04	1,030E+00	1,054E-04
0,8	1,047E+00	1,613E-04	1,047E+00	1,624E-04	1,044E+00	1,681E-04	1,042E+00	1,708E-04
1	1,066E+00	2,375E-04	1,065E+00	2,391E-04	1,061E+00	2,474E-04	1,058E+00	2,515E-04
1,2	1,088E+00	3,280E-04	1,087E+00	3,302E-04	1,082E+00	3,417E-04	1,077E+00	3,473E-04
1,4	1,115E+00	4,328E-04	1,113E+00	4,357E-04	1,106E+00	4,509E-04	1,099E+00	4,583E-04
1,6	1,146E+00	5,519E-04	1,143E+00	5,556E-04	1,134E+00	5,750E-04	1,125E+00	5,844E-04
1,8	1,181E+00	6,853E-04	1,177E+00	6,899E-04	1,166E+00	7,140E-04	1,154E+00	7,257E-04
2	1,219E+00	8,330E-04	1,215E+00	8,386E-04	1,201E+00	8,679E-04	1,187E+00	8,821E-04
2,5	1,334E+00	1,265E-03	1,328E+00	1,273E-03	1,306E+00	1,318E-03	1,283E+00	1,340E-03
3	1,474E+00	1,786E-03	1,465E+00	1,798E-03	1,433E+00	1,861E-03	1,401E+00	1,892E-03
3,5	1,639E+00	2,397E-03	1,626E+00	2,413E-03	1,583E+00	2,497E-03	1,539E+00	2,538E-03
4	1,829E+00	3,096E-03	1,812E+00	3,117E-03	1,755E+00	3,226E-03	1,698E+00	3,279E-03
4,5	2,043E+00	3,884E-03	2,021E+00	3,911E-03	1,949E+00	4,048E-03	1,877E+00	4,114E-03
5	2,281E+00	4,762E-03	2,254E+00	4,794E-03	2,165E+00	4,962E-03	2,076E+00	5,044E-03
5,5	2,543E+00	5,727E-03	2,510E+00	5,766E-03	2,402E+00	5,968E-03	2,294E+00	6,067E-03
6	2,828E+00	6,782E-03	2,788E+00	6,827E-03	2,660E+00	7,067E-03	2,531E+00	7,185E-03
6,5	3,136E+00	7,924E-03	3,089E+00	7,978E-03	2,938E+00	8,258E-03	2,787E+00	8,396E-03
7	3,466E+00	9,155E-03	3,411E+00	9,217E-03	3,235E+00	9,541E-03	3,060E+00	9,700E-03
7,5	3,819E+00	1,047E-02	3,754E+00	1,054E-02	3,552E+00	1,092E-02	3,352E+00	1,110E-02
8	4,192E+00	1,188E-02	4,118E+00	1,196E-02	3,888E+00	1,238E-02	3,660E+00	1,259E-02
8,5	4,586E+00	1,337E-02	4,502E+00	1,346E-02	4,241E+00	1,394E-02	3,985E+00	1,417E-02
9	5,001E+00	1,495E-02	4,905E+00	1,505E-02	4,612E+00	1,559E-02	4,325E+00	1,585E-02
9,5	5,436E+00	1,662E-02	5,328E+00	1,673E-02	5,000E+00	1,733E-02	4,681E+00	1,762E-02
10	5,889E+00	1,837E-02	5,768E+00	1,850E-02	5,404E+00	1,916E-02	5,051E+00	1,948E-02
12	7,882E+00	2,625E-02	7,699E+00	2,643E-02	7,170E+00	2,738E-02	6,666E+00	2,785E-02
14	1,013E+01	3,548E-02	9,868E+00	3,573E-02	9,143E+00	3,703E-02	8,465E+00	3,767E-02
16	1,260E+01	4,605E-02	1,223E+01	4,638E-02	1,128E+01	4,809E-02	1,041E+01	4,894E-02
18	1,524E+01	5,794E-02	1,476E+01	5,837E-02	1,354E+01	6,054E-02	1,245E+01	6,163E-02
20	1,801E+01	7,114E-02	1,739E+01	7,167E-02	1,589E+01	7,438E-02	1,456E+01	7,575E-02
30	3,285E+01	1,560E-01	3,124E+01	1,574E-01	2,791E+01	1,639E-01	2,524E+01	1,672E-01
32,5	3,659E+01	1,821E-01	3,466E+01	1,837E-01	3,080E+01	1,914E-01	2,777E+01	1,954E-01
35	4,027E+01	2,100E-01	3,801E+01	2,119E-01	3,360E+01	2,210E-01	3,020E+01	2,258E-01

1 mm	Bez odsunutí		Odsunutí o 1 vrstvu		Odsunutí o 2 vrstvy		Odsunutí o 3 vrstvy	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
37,5	4,387E+01	2,397E-01	4,126E+01	2,421E-01	3,630E+01	2,527E-01	3,253E+01	2,583E-01
40	4,739E+01	2,714E-01	4,441E+01	2,742E-01	3,889E+01	2,864E-01	3,476E+01	2,929E-01
42,5	5,080E+01	3,048E-01	4,746E+01	3,081E-01	4,137E+01	3,222E-01	3,689E+01	3,296E-01
45	5,412E+01	3,401E-01	5,039E+01	3,440E-01	4,374E+01	3,600E-01	3,891E+01	3,685E-01
47,5	5,732E+01	3,773E-01	5,321E+01	3,817E-01	4,601E+01	3,998E-01	4,083E+01	4,094E-01
50	6,042E+01	4,163E-01	5,593E+01	4,213E-01	4,817E+01	4,417E-01	4,266E+01	4,525E-01
55	6,630E+01	4,997E-01	6,104E+01	5,063E-01	5,221E+01	5,316E-01	4,606E+01	5,451E-01
60	7,177E+01	5,905E-01	6,576E+01	5,987E-01	5,590E+01	6,297E-01	4,915E+01	6,461E-01
80	9,033E+01	1,027E+00	8,153E+01	1,044E+00	6,805E+01	1,104E+00	5,923E+01	1,136E+00
100	1,052E+02	1,581E+00	9,404E+01	1,612E+00	7,760E+01	1,710E+00	6,710E+01	1,761E+00
150	1,353E+02	3,481E+00	1,192E+02	3,563E+00	9,686E+01	3,799E+00	8,302E+01	3,924E+00
200	1,612E+02	6,116E+00	1,411E+02	6,273E+00	1,137E+02	6,709E+00	9,696E+01	6,940E+00
250	1,850E+02	9,478E+00	1,612E+02	9,738E+00	1,291E+02	1,043E+01	1,098E+02	1,080E+01
300	2,071E+02	1,357E+01	1,798E+02	1,395E+01	1,435E+02	1,498E+01	1,217E+02	1,552E+01

## Příloha 4. – Ztráty vinutí z rozdílných materiálů

$f$ (kHz)	CU		AL		AL+CU	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	6,492E-01	5,740E-07	9,909E-01	5,740E-07	7,347E-01	5,740E-07
0,05	6,495E-01	3,212E-06	9,911E-01	3,212E-06	7,349E-01	3,210E-06
0,1	6,504E-01	7,278E-06	9,917E-01	7,278E-06	7,356E-01	7,280E-06
0,2	6,539E-01	1,797E-05	9,940E-01	1,797E-05	7,383E-01	1,800E-05
0,3	6,598E-01	3,208E-05	9,979E-01	3,208E-05	7,428E-01	3,210E-05
0,4	6,681E-01	4,961E-05	1,003E+00	4,961E-05	7,492E-01	4,960E-05
0,5	6,787E-01	7,055E-05	1,010E+00	7,055E-05	7,573E-01	7,060E-05
0,6	6,917E-01	9,490E-05	1,019E+00	9,491E-05	7,673E-01	9,490E-05
0,8	7,247E-01	1,539E-04	1,040E+00	1,539E-04	7,927E-01	1,539E-04
1	7,670E-01	2,264E-04	1,068E+00	2,265E-04	8,254E-01	2,265E-04
1,2	8,187E-01	3,127E-04	1,102E+00	3,128E-04	8,652E-01	3,127E-04
1,4	8,798E-01	4,125E-04	1,142E+00	4,127E-04	9,123E-01	4,126E-04
1,6	9,501E-01	5,260E-04	1,188E+00	5,262E-04	9,665E-01	5,262E-04
1,8	1,030E+00	6,531E-04	1,241E+00	6,534E-04	1,028E+00	6,533E-04
2	1,118E+00	7,937E-04	1,299E+00	7,943E-04	1,096E+00	7,941E-04
2,5	1,380E+00	1,205E-03	1,472E+00	1,206E-03	1,299E+00	1,205E-03
3	1,697E+00	1,700E-03	1,683E+00	1,702E-03	1,544E+00	1,702E-03
3,5	2,069E+00	2,279E-03	1,930E+00	2,284E-03	1,833E+00	2,282E-03
4	2,493E+00	2,942E-03	2,215E+00	2,950E-03	2,164E+00	2,947E-03
4,5	2,969E+00	3,687E-03	2,536E+00	3,700E-03	2,536E+00	3,695E-03
5	3,493E+00	4,515E-03	2,893E+00	4,534E-03	2,948E+00	4,527E-03
5,5	4,065E+00	5,425E-03	3,285E+00	5,452E-03	3,399E+00	5,442E-03
6	4,682E+00	6,415E-03	3,711E+00	6,453E-03	3,887E+00	6,440E-03
6,5	5,342E+00	7,486E-03	4,171E+00	7,538E-03	4,412E+00	7,519E-03
7	6,041E+00	8,636E-03	4,664E+00	8,705E-03	4,971E+00	8,680E-03
7,5	6,779E+00	9,865E-03	5,189E+00	9,954E-03	5,565E+00	9,922E-03
8	7,551E+00	1,117E-02	5,745E+00	1,129E-02	6,190E+00	1,124E-02
8,5	8,357E+00	1,256E-02	6,331E+00	1,270E-02	6,846E+00	1,265E-02
9	9,193E+00	1,402E-02	6,946E+00	1,419E-02	7,531E+00	1,413E-02
9,5	1,006E+01	1,555E-02	7,590E+00	1,576E-02	8,244E+00	1,569E-02
10	1,095E+01	1,716E-02	8,261E+00	1,742E-02	8,982E+00	1,733E-02
12	1,471E+01	2,434E-02	1,120E+01	2,482E-02	1,217E+01	2,465E-02
14	1,869E+01	3,265E-02	1,448E+01	3,347E-02	1,566E+01	3,318E-02
16	2,277E+01	4,206E-02	1,805E+01	4,332E-02	1,936E+01	4,287E-02
18	2,686E+01	5,253E-02	2,183E+01	5,434E-02	2,320E+01	5,370E-02
20	3,087E+01	6,403E-02	2,577E+01	6,650E-02	2,712E+01	6,564E-02
30	4,873E+01	1,366E-01	4,608E+01	1,436E-01	4,646E+01	1,412E-01

$f$ (kHz)	CU		AL		AL+CU	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	5,253E+01	1,586E-01	5,099E+01	1,669E-01	5,098E+01	1,641E-01
35	5,607E+01	1,821E-01	5,577E+01	1,918E-01	5,534E+01	1,886E-01
37,5	5,938E+01	2,072E-01	6,038E+01	2,182E-01	5,952E+01	2,146E-01
40	6,247E+01	2,339E-01	6,481E+01	2,462E-01	6,352E+01	2,422E-01
42,5	6,538E+01	2,620E-01	6,906E+01	2,758E-01	6,734E+01	2,713E-01
45	6,813E+01	2,918E-01	7,313E+01	3,069E-01	7,099E+01	3,020E-01
47,5	7,072E+01	3,231E-01	7,703E+01	3,395E-01	7,448E+01	3,342E-01
50	7,318E+01	3,560E-01	8,075E+01	3,737E-01	7,781E+01	3,680E-01
55	7,777E+01	4,264E-01	8,771E+01	4,467E-01	8,405E+01	4,402E-01
60	8,200E+01	5,032E-01	9,408E+01	5,258E-01	8,979E+01	5,186E-01
80	9,669E+01	8,731E-01	1,152E+02	9,048E-01	1,090E+02	8,948E-01
100	1,096E+02	1,343E+00	1,318E+02	1,384E+00	1,246E+02	1,371E+00
150	1,383E+02	2,955E+00	1,656E+02	3,023E+00	1,570E+02	3,002E+00
200	1,637E+02	5,182E+00	1,951E+02	5,286E+00	1,853E+02	5,253E+00
250	1,865E+02	8,019E+00	2,222E+02	8,166E+00	2,112E+02	8,121E+00
300	2,073E+02	1,147E+01	2,474E+02	1,166E+01	2,350E+02	1,160E+01

**Příloha 5. – Ztráty vinutí s rozdílným počtem paralelních vodičů**

$f$ (kHz)	$np = 1$		$np = 2$		$np = 3$	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	6,492E-01	5,733E-07	6,262E-01	5,579E-07	6,708E-01	5,676E-07
0,05	6,495E-01	3,208E-06	6,263E-01	3,121E-06	6,709E-01	3,176E-06
0,1	6,504E-01	7,269E-06	6,268E-01	7,073E-06	6,712E-01	7,196E-06
0,2	6,539E-01	1,795E-05	6,287E-01	1,747E-05	6,723E-01	1,777E-05
0,3	6,598E-01	3,204E-05	6,318E-01	3,118E-05	6,743E-01	3,172E-05
0,4	6,681E-01	4,955E-05	6,361E-01	4,821E-05	6,770E-01	4,905E-05
0,5	6,787E-01	7,046E-05	6,417E-01	6,857E-05	6,805E-01	6,976E-05
0,6	6,917E-01	9,479E-05	6,486E-01	9,224E-05	6,848E-01	9,385E-05
0,8	7,246E-01	1,537E-04	6,660E-01	1,495E-04	6,957E-01	1,522E-04
1	7,670E-01	2,262E-04	6,884E-01	2,201E-04	7,098E-01	2,240E-04
1,2	8,187E-01	3,123E-04	7,157E-01	3,040E-04	7,269E-01	3,093E-04
1,4	8,798E-01	4,120E-04	7,480E-01	4,011E-04	7,472E-01	4,081E-04
1,6	9,501E-01	5,254E-04	7,853E-01	5,115E-04	7,706E-01	5,205E-04
1,8	1,030E+00	6,523E-04	8,275E-01	6,351E-04	7,971E-01	6,463E-04
2	1,118E+00	7,927E-04	8,746E-01	7,720E-04	8,267E-01	7,857E-04
2,5	1,380E+00	1,203E-03	1,014E+00	1,172E-03	9,142E-01	1,193E-03
3	1,697E+00	1,698E-03	1,184E+00	1,655E-03	1,021E+00	1,685E-03
3,5	2,069E+00	2,276E-03	1,384E+00	2,221E-03	1,147E+00	2,261E-03
4	2,493E+00	2,938E-03	1,614E+00	2,868E-03	1,292E+00	2,921E-03
4,5	2,969E+00	3,683E-03	1,875E+00	3,598E-03	1,457E+00	3,665E-03
5	3,493E+00	4,510E-03	2,164E+00	4,410E-03	1,640E+00	4,494E-03
5,5	4,065E+00	5,418E-03	2,483E+00	5,304E-03	1,842E+00	5,406E-03
6	4,682E+00	6,407E-03	2,830E+00	6,280E-03	2,063E+00	6,403E-03
6,5	5,341E+00	7,477E-03	3,205E+00	7,336E-03	2,302E+00	7,483E-03
7	6,041E+00	8,626E-03	3,608E+00	8,474E-03	2,560E+00	8,646E-03
7,5	6,778E+00	9,853E-03	4,039E+00	9,692E-03	2,835E+00	9,893E-03
8	7,551E+00	1,116E-02	4,496E+00	1,099E-02	3,129E+00	1,122E-02
8,5	8,357E+00	1,254E-02	4,979E+00	1,237E-02	3,441E+00	1,264E-02
9	9,192E+00	1,400E-02	5,487E+00	1,383E-02	3,770E+00	1,413E-02
9,5	1,006E+01	1,553E-02	6,021E+00	1,537E-02	4,117E+00	1,571E-02
10	1,094E+01	1,714E-02	6,578E+00	1,698E-02	4,481E+00	1,738E-02
12	1,470E+01	2,431E-02	9,038E+00	2,423E-02	6,104E+00	2,485E-02
14	1,869E+01	3,261E-02	1,183E+01	3,271E-02	7,987E+00	3,364E-02
16	2,277E+01	4,201E-02	1,491E+01	4,239E-02	1,011E+01	4,372E-02
18	2,685E+01	5,246E-02	1,823E+01	5,325E-02	1,246E+01	5,509E-02
20	3,087E+01	6,395E-02	2,174E+01	6,525E-02	1,503E+01	6,773E-02
30	4,873E+01	1,364E-01	4,074E+01	1,416E-01	3,044E+01	1,494E-01

$f$ (kHz)	$np = 1$		$np = 2$		$np = 3$	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	5,252E+01	1,584E-01	4,556E+01	1,647E-01	3,481E+01	1,744E-01
35	5,607E+01	1,819E-01	5,031E+01	1,894E-01	3,933E+01	2,013E-01
37,5	5,937E+01	2,069E-01	5,495E+01	2,156E-01	4,397E+01	2,299E-01
40	6,247E+01	2,335E-01	5,948E+01	2,434E-01	4,869E+01	2,603E-01
42,5	6,538E+01	2,617E-01	6,386E+01	2,726E-01	5,348E+01	2,924E-01
45	6,812E+01	2,914E-01	6,809E+01	3,034E-01	5,830E+01	3,261E-01
47,5	7,072E+01	3,227E-01	7,217E+01	3,356E-01	6,315E+01	3,615E-01
50	7,318E+01	3,555E-01	7,609E+01	3,693E-01	6,800E+01	3,986E-01
55	7,776E+01	4,259E-01	8,345E+01	4,413E-01	7,764E+01	4,776E-01
60	8,199E+01	5,025E-01	9,021E+01	5,191E-01	8,710E+01	5,630E-01
80	9,669E+01	8,719E-01	1,122E+02	8,907E-01	1,219E+02	9,667E-01
100	1,096E+02	1,342E+00	1,287E+02	1,359E+00	1,509E+02	1,469E+00
150	1,383E+02	2,951E+00	1,593E+02	2,961E+00	2,031E+02	3,155E+00
200	1,637E+02	5,174E+00	1,843E+02	5,176E+00	2,393E+02	5,467E+00
250	1,865E+02	8,008E+00	2,073E+02	8,001E+00	2,689E+02	8,409E+00
300	2,073E+02	1,145E+01	2,287E+02	1,143E+01	2,954E+02	1,198E+01

## Příloha 6. – Nastavení Litz Wire simulací

$f$ (kHz)	Litz Wire přes Excitations		Litz Wire přes materiál		Fyzicky modelované vodiče	
	$\Delta P_W$ (kW)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (kW)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	6,708E-04	5,702E-07	6,708E-04	5,701E-07	6,708E-01	5,701E-07
0,05	6,708E-04	3,190E-06	6,708E-04	3,190E-06	6,709E-01	3,190E-06
0,1	6,711E-04	7,229E-06	6,711E-04	7,228E-06	6,711E-01	7,229E-06
0,2	6,721E-04	1,785E-05	6,721E-04	1,785E-05	6,721E-01	1,785E-05
0,3	6,738E-04	3,187E-05	6,738E-04	3,187E-05	6,739E-01	3,187E-05
0,4	6,761E-04	4,928E-05	6,761E-04	4,927E-05	6,763E-01	4,927E-05
0,5	6,792E-04	7,008E-05	6,792E-04	7,008E-05	6,793E-01	7,008E-05
0,6	6,829E-04	9,428E-05	6,829E-04	9,427E-05	6,831E-01	9,427E-05
0,8	6,923E-04	1,528E-04	6,923E-04	1,528E-04	6,927E-01	1,528E-04
1	7,044E-04	2,250E-04	7,044E-04	2,250E-04	7,050E-01	2,250E-04
1,2	7,192E-04	3,107E-04	7,192E-04	3,107E-04	7,201E-01	3,107E-04
1,4	7,367E-04	4,100E-04	7,367E-04	4,100E-04	7,379E-01	4,100E-04
1,6	7,569E-04	5,229E-04	7,569E-04	5,229E-04	7,585E-01	5,228E-04
1,8	7,798E-04	6,493E-04	7,798E-04	6,493E-04	7,817E-01	6,492E-04
2	8,053E-04	7,893E-04	8,053E-04	7,893E-04	8,078E-01	7,892E-04
2,5	8,811E-04	1,199E-03	8,811E-04	1,199E-03	8,847E-01	1,198E-03
3	9,736E-04	1,693E-03	9,736E-04	1,693E-03	9,787E-01	1,693E-03
3,5	1,083E-03	2,272E-03	1,083E-03	2,272E-03	1,090E+00	2,271E-03
4	1,209E-03	2,936E-03	1,209E-03	2,936E-03	1,217E+00	2,935E-03
4,5	1,352E-03	3,685E-03	1,352E-03	3,685E-03	1,362E+00	3,682E-03
5	1,512E-03	4,519E-03	1,512E-03	4,518E-03	1,523E+00	4,515E-03
5,5	1,689E-03	5,437E-03	1,689E-03	5,437E-03	1,701E+00	5,432E-03
6	1,882E-03	6,440E-03	1,882E-03	6,440E-03	1,896E+00	6,433E-03
6,5	2,092E-03	7,528E-03	2,092E-03	7,528E-03	2,107E+00	7,518E-03
7	2,320E-03	8,701E-03	2,320E-03	8,701E-03	2,334E+00	8,688E-03
7,5	2,564E-03	9,959E-03	2,564E-03	9,959E-03	2,578E+00	9,942E-03
8	2,824E-03	1,130E-02	2,824E-03	1,130E-02	2,837E+00	1,128E-02
8,5	3,102E-03	1,273E-02	3,102E-03	1,273E-02	3,113E+00	1,270E-02
9	3,396E-03	1,424E-02	3,396E-03	1,424E-02	3,404E+00	1,421E-02
9,5	3,708E-03	1,584E-02	3,708E-03	1,584E-02	3,710E+00	1,579E-02
10	4,036E-03	1,752E-02	4,036E-03	1,752E-02	4,033E+00	1,747E-02
12	5,516E-03	2,510E-02	5,516E-03	2,510E-02	5,472E+00	2,499E-02
14	7,266E-03	3,403E-02	7,266E-03	3,403E-02	7,143E+00	3,383E-02
16	9,285E-03	4,432E-02	9,285E-03	4,432E-02	9,033E+00	4,398E-02
18	1,157E-02	5,597E-02	1,157E-02	5,597E-02	1,113E+01	5,544E-02
20	1,413E-02	6,898E-02	1,413E-02	6,897E-02	1,341E+01	6,818E-02
30	3,096E-02	1,544E-01	3,096E-02	1,544E-01	2,710E+01	1,507E-01



$f$ (kHz)	Litz Wire přes Excitations		Litz Wire přes materiál		Fyzicky modelované vodiče	
	$\Delta P_W$ (kW)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (kW)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	3,621E-02	1,810E-01	3,621E-02	1,810E-01	3,097E+01	1,760E-01
35	4,189E-02	2,098E-01	4,189E-02	2,098E-01	3,496E+01	2,033E-01
37,5	4,799E-02	2,407E-01	4,799E-02	2,407E-01	3,904E+01	2,323E-01
40	5,451E-02	2,737E-01	5,451E-02	2,737E-01	4,319E+01	2,632E-01
42,5	6,145E-02	3,088E-01	6,145E-02	3,088E-01	4,739E+01	2,958E-01
45	6,881E-02	3,461E-01	6,881E-02	3,461E-01	5,161E+01	3,302E-01
47,5	7,659E-02	3,855E-01	7,659E-02	3,854E-01	5,584E+01	3,663E-01
50	8,479E-02	4,270E-01	8,479E-02	4,269E-01	6,006E+01	4,041E-01
55	1,025E-01	5,163E-01	1,025E-01	5,163E-01	6,842E+01	4,849E-01
60	1,218E-01	6,142E-01	1,218E-01	6,141E-01	7,660E+01	5,724E-01
80	2,160E-01	1,090E+00	2,160E-01	1,090E+00	1,065E+02	9,883E-01
100	3,372E-01	1,702E+00	3,372E-01	1,702E+00	1,312E+02	1,509E+00
150	7,578E-01	3,826E+00	7,578E-01	3,826E+00	1,755E+02	3,268E+00
200	1,347E+00	6,798E+00	1,347E+00	6,798E+00	2,062E+02	5,690E+00
250	2,104E+00	1,062E+01	2,104E+00	1,062E+01	2,311E+02	8,778E+00
300	3,029E+00	1,529E+01	3,029E+00	1,529E+01	2,533E+02	1,253E+01

## Příloha 7. –Litz Wire konfigurace

$f$ (kHz)	$np = 8$		$np = 13$		$np = 25$	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	6,262E-01	5,776E-07	6,370E-01	5,776E-07	6,492E-01	5,776E-07
0,05	6,262E-01	3,232E-06	6,370E-01	3,232E-06	6,492E-01	3,232E-06
0,1	6,263E-01	7,323E-06	6,371E-01	7,323E-06	6,492E-01	7,323E-06
0,2	6,268E-01	1,808E-05	6,373E-01	1,808E-05	6,494E-01	1,808E-05
0,3	6,276E-01	3,228E-05	6,378E-01	3,228E-05	6,496E-01	3,228E-05
0,4	6,287E-01	4,992E-05	6,385E-01	4,992E-05	6,499E-01	4,992E-05
0,5	6,301E-01	7,099E-05	6,393E-01	7,099E-05	6,504E-01	7,099E-05
0,6	6,318E-01	9,550E-05	6,403E-01	9,550E-05	6,509E-01	9,550E-05
0,8	6,362E-01	1,548E-04	6,429E-01	1,548E-04	6,522E-01	1,548E-04
1	6,419E-01	2,279E-04	6,463E-01	2,279E-04	6,539E-01	2,279E-04
1,2	6,488E-01	3,148E-04	6,504E-01	3,148E-04	6,559E-01	3,148E-04
1,4	6,570E-01	4,153E-04	6,553E-01	4,153E-04	6,584E-01	4,153E-04
1,6	6,664E-01	5,297E-04	6,609E-01	5,297E-04	6,612E-01	5,297E-04
1,8	6,771E-01	6,578E-04	6,672E-01	6,578E-04	6,643E-01	6,578E-04
2	6,890E-01	7,996E-04	6,743E-01	7,996E-04	6,679E-01	7,996E-04
2,5	7,243E-01	1,214E-03	6,954E-01	1,214E-03	6,784E-01	1,214E-03
3	7,676E-01	1,715E-03	7,210E-01	1,715E-03	6,913E-01	1,715E-03
3,5	8,186E-01	2,302E-03	7,514E-01	2,302E-03	7,065E-01	2,302E-03
4	8,775E-01	2,974E-03	7,864E-01	2,974E-03	7,240E-01	2,974E-03
4,5	9,443E-01	3,733E-03	8,261E-01	3,733E-03	7,439E-01	3,733E-03
5	1,019E+00	4,577E-03	8,705E-01	4,577E-03	7,661E-01	4,577E-03
5,5	1,101E+00	5,508E-03	9,195E-01	5,508E-03	7,906E-01	5,508E-03
6	1,192E+00	6,524E-03	9,732E-01	6,524E-03	8,175E-01	6,524E-03
6,5	1,290E+00	7,626E-03	1,032E+00	7,626E-03	8,467E-01	7,626E-03
7	1,396E+00	8,814E-03	1,095E+00	8,814E-03	8,783E-01	8,814E-03
7,5	1,510E+00	1,009E-02	1,162E+00	1,009E-02	9,122E-01	1,009E-02
8	1,632E+00	1,145E-02	1,235E+00	1,145E-02	9,484E-01	1,145E-02
8,5	1,761E+00	1,289E-02	1,312E+00	1,289E-02	9,870E-01	1,289E-02
9	1,899E+00	1,443E-02	1,394E+00	1,443E-02	1,028E+00	1,443E-02
9,5	2,044E+00	1,604E-02	1,480E+00	1,604E-02	1,071E+00	1,604E-02
10	2,197E+00	1,775E-02	1,571E+00	1,775E-02	1,117E+00	1,775E-02
12	2,888E+00	2,542E-02	1,982E+00	2,542E-02	1,322E+00	2,542E-02
14	3,705E+00	3,447E-02	2,468E+00	3,447E-02	1,566E+00	3,447E-02
16	4,648E+00	4,490E-02	3,028E+00	4,490E-02	1,846E+00	4,490E-02
18	5,716E+00	5,670E-02	3,663E+00	5,670E-02	2,164E+00	5,670E-02
20	6,910E+00	6,987E-02	4,373E+00	6,987E-02	2,519E+00	6,987E-02
30	1,477E+01	1,564E-01	9,044E+00	1,564E-01	4,857E+00	1,564E-01

$f$ (kHz)	$np = 8$		$np = 13$		$np = 25$	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	1,722E+01	1,834E-01	1,050E+01	1,834E-01	5,587E+00	1,834E-01
35	1,987E+01	2,125E-01	1,208E+01	2,125E-01	6,376E+00	2,125E-01
37,5	2,272E+01	2,438E-01	1,377E+01	2,438E-01	7,224E+00	2,438E-01
40	2,576E+01	2,772E-01	1,558E+01	2,773E-01	8,129E+00	2,772E-01
42,5	2,900E+01	3,128E-01	1,751E+01	3,128E-01	9,094E+00	3,128E-01
45	3,244E+01	3,506E-01	1,955E+01	3,506E-01	1,012E+01	3,506E-01
47,5	3,607E+01	3,905E-01	2,171E+01	3,905E-01	1,120E+01	3,905E-01
50	3,990E+01	4,325E-01	2,399E+01	4,325E-01	1,234E+01	4,325E-01
55	4,815E+01	5,230E-01	2,889E+01	5,230E-01	1,479E+01	5,230E-01
60	5,718E+01	6,221E-01	3,426E+01	6,221E-01	1,748E+01	6,221E-01
80	1,012E+02	1,105E+00	6,042E+01	1,105E+00	3,057E+01	1,105E+00
100	1,577E+02	1,724E+00	9,405E+01	1,724E+00	4,740E+01	1,724E+00
150	3,541E+02	3,876E+00	2,108E+02	3,876E+00	1,058E+02	3,876E+00
200	6,290E+02	6,886E+00	3,743E+02	6,886E+00	1,877E+02	6,886E+00
250	9,825E+02	1,076E+01	5,844E+02	1,076E+01	2,928E+02	1,076E+01
300	1,415E+03	1,549E+01	8,413E+02	1,549E+01	4,214E+02	1,549E+01

**Příloha 8. –Vliv tvaru závitu na velikosti ztrát**

$f$ (kHz)	Vertikálně		Horizontálně	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
0,01	6,708E-01	5,676E-07	6,708E-01	5,824E-07
0,05	6,717E-01	3,176E-06	6,710E-01	3,259E-06
0,1	6,743E-01	7,196E-06	6,717E-01	7,384E-06
0,2	6,850E-01	1,777E-05	6,745E-01	1,823E-05
0,3	7,026E-01	3,171E-05	6,791E-01	3,255E-05
0,4	7,273E-01	4,902E-05	6,856E-01	5,033E-05
0,5	7,590E-01	6,970E-05	6,939E-01	7,157E-05
0,6	7,976E-01	9,372E-05	7,040E-01	9,628E-05
0,8	8,951E-01	1,518E-04	7,295E-01	1,561E-04
1	1,019E+00	2,232E-04	7,620E-01	2,296E-04
1,2	1,168E+00	3,077E-04	8,013E-01	3,170E-04
1,4	1,342E+00	4,053E-04	8,470E-01	4,182E-04
1,6	1,538E+00	5,158E-04	8,989E-01	5,330E-04
1,8	1,756E+00	6,390E-04	9,566E-01	6,616E-04
2	1,993E+00	7,748E-04	1,020E+00	8,038E-04
2,5	2,662E+00	1,168E-03	1,200E+00	1,219E-03
3	3,417E+00	1,637E-03	1,406E+00	1,718E-03
3,5	4,232E+00	2,178E-03	1,633E+00	2,302E-03
4	5,083E+00	2,789E-03	1,877E+00	2,969E-03
4,5	5,950E+00	3,468E-03	2,135E+00	3,719E-03
5	6,816E+00	4,213E-03	2,403E+00	4,551E-03
5,5	7,670E+00	5,024E-03	2,679E+00	5,467E-03
6	8,502E+00	5,899E-03	2,963E+00	6,465E-03
6,5	9,306E+00	6,838E-03	3,254E+00	7,545E-03
7	1,008E+01	7,841E-03	3,551E+00	8,707E-03
7,5	1,082E+01	8,907E-03	3,855E+00	9,951E-03
8	1,153E+01	1,004E-02	4,165E+00	1,128E-02
8,5	1,221E+01	1,123E-02	4,483E+00	1,269E-02
9	1,286E+01	1,249E-02	4,808E+00	1,418E-02
9,5	1,348E+01	1,381E-02	5,140E+00	1,575E-02
10	1,408E+01	1,519E-02	5,481E+00	1,740E-02
12	1,626E+01	2,137E-02	6,934E+00	2,484E-02
14	1,820E+01	2,859E-02	8,541E+00	3,358E-02
16	2,002E+01	3,684E-02	1,031E+01	4,362E-02
18	2,177E+01	4,614E-02	1,225E+01	5,495E-02
20	2,351E+01	5,648E-02	1,435E+01	6,756E-02
30	3,256E+01	1,236E-01	2,698E+01	1,494E-01

$f$ (kHz)	Vertikálně		Horizontálně	
	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)	$\Delta P_W$ (W)	$\Delta P_{FE}$ (kW)
32,5	3,497E+01	1,444E-01	3,059E+01	1,747E-01
35	3,742E+01	1,667E-01	3,435E+01	2,018E-01
37,5	3,991E+01	1,906E-01	3,822E+01	2,307E-01
40	4,244E+01	2,160E-01	4,218E+01	2,615E-01
42,5	4,499E+01	2,429E-01	4,622E+01	2,941E-01
45	4,756E+01	2,714E-01	5,032E+01	3,284E-01
47,5	5,013E+01	3,013E-01	5,446E+01	3,645E-01
50	5,270E+01	3,328E-01	5,862E+01	4,024E-01
55	5,780E+01	4,001E-01	6,694E+01	4,832E-01
60	6,282E+01	4,734E-01	7,521E+01	5,709E-01
80	8,147E+01	8,246E-01	1,064E+02	9,880E-01
100	9,741E+01	1,268E+00	1,334E+02	1,510E+00
150	1,277E+02	2,781E+00	1,843E+02	3,268E+00
200	1,501E+02	4,871E+00	2,209E+02	5,682E+00
250	1,689E+02	7,540E+00	2,509E+02	8,754E+00
300	1,859E+02	1,079E+01	2,778E+02	1,248E+01

## Příloha 9. –Výsledky měření

cívka 0,35 mm							
$f$ (kHz)	$I$ (mA)	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Z_s$ ( $\Omega$ )	$U$ (V)	$\Delta P$ (mW)	P/f
0,01	15	447,231	0,909	0,910	0,014	0,205	2,046E-05
0,05	15	399,019	0,909	0,918	0,014	0,205	4,092E-06
0,1	15	397,231	0,909	0,943	0,014	0,205	2,046E-06
1	15	396,175	0,927	2,656	0,040	0,209	2,085E-07
2	15	395,595	0,971	5,065	0,076	0,218	1,092E-07
10	15	390,126	2,085	24,601	0,369	0,469	4,692E-08
20	15	381,877	4,731	48,221	0,723	1,064	5,322E-08
40	15	366,590	12,131	92,929	1,394	2,729	6,824E-08
50	15	359,950	16,441	114,270	1,714	3,699	7,398E-08
100	15	334,251	41,234	214,026	3,210	9,278	9,278E-08
200	15	301,161	97,667	390,849	5,863	21,975	1,099E-07
250	15	288,948	127,500	384,837	5,773	28,688	1,148E-07
300	15	278,700	158,000	465,420	6,981	35,550	1,185E-07

cívka 1,25 mm							
$f$ (kHz)	$I$ (mA)	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Z_s$ ( $\Omega$ )	$U$ (V)	$\Delta P$ (mW)	P/f
0,01	15	354,700	0,067	0,071	0,001	0,015	1,508E-03
0,05	15	305,338	0,067	0,117	0,002	0,015	3,022E-04
0,1	15	303,539	0,067	0,202	0,003	0,015	1,517E-04
1	15	302,421	0,091	1,902	0,029	0,020	2,039E-05
2	15	301,831	0,154	3,796	0,057	0,035	1,735E-05
10	15	292,560	1,871	18,477	0,277	0,421	4,210E-05
20	15	276,180	5,623	35,158	0,527	1,265	6,326E-05
40	15	251,090	13,940	64,627	0,969	3,137	7,841E-05
50	15	242,616	18,151	78,351	1,175	4,084	8,168E-05
100	15	216,000	41,370	141,882	2,128	9,308	9,308E-05
200	15	184,760	95,430	251,023	3,765	21,472	1,074E-04
250	15	173,020	124,280	250,436	3,757	27,963	1,119E-04
300	15	162,980	153,440	298,470	4,477	34,524	1,151E-04

cívka 0,71 mm							
$f$ (kHz)	$I$ (mA)	$L_s$ ( $\mu$ H)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$Z_s$ ( $\Omega$ )	$U$ (V)	$\Delta P$ (mW)	$P/f$
0,01	15	351,605	0,065	0,069	0,001	0,015	1,467E-06
0,05	15	284,100	0,065	0,111	0,002	0,015	2,939E-07
0,1	15	281,000	0,066	0,188	0,003	0,015	1,474E-07
1	15	280,000	0,087	1,761	0,026	0,019	1,949E-08
2	15	280,000	0,144	3,522	0,053	0,032	1,620E-08
10	15	272,000	1,670	17,172	0,258	0,376	3,758E-08
20	15	260,000	5,200	33,084	0,496	1,170	5,850E-08
40	15	238,400	14,800	61,717	0,926	3,330	8,325E-08
50	15	228,900	20,200	74,694	1,120	4,545	9,090E-08
100	15	193,700	48,900	131,162	1,967	11,003	1,100E-07
200	15	153,200	107,800	220,644	3,310	24,255	1,213E-07
250	15	139,100	136,900	257,843	3,868	30,803	1,232E-07
300	15	127,300	165,400	291,437	4,372	37,215	1,241E-07

## Příloha 10. – Model cívky 0,35 mm

$f$ (kHz)	Před validací koeficientů		Po validaci koeficientů	
	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)
0,01	1,118E-05	1,291E-01	2,503E-04	1,291E-01
0,02	2,302E-05	1,291E-01	1,288E-03	1,291E-01
0,05	6,254E-05	1,291E-01	2,630E-03	1,291E-01
0,1	1,417E-04	1,291E-01	5,415E-03	1,291E-01
0,2	3,500E-04	1,291E-01	8,300E-03	1,291E-01
0,3	6,247E-04	1,291E-01	1,127E-02	1,291E-01
0,4	9,661E-04	1,291E-01	1,430E-02	1,291E-01
0,5	1,374E-03	1,291E-01	1,740E-02	1,291E-01
0,6	1,848E-03	1,291E-01	2,376E-02	1,291E-01
0,8	2,997E-03	1,291E-01	3,033E-02	1,291E-01
1	4,411E-03	1,291E-01	3,707E-02	1,292E-01
1,2	6,092E-03	1,292E-01	4,397E-02	1,292E-01
1,4	8,038E-03	1,292E-01	5,102E-02	1,292E-01
1,6	1,025E-02	1,292E-01	5,821E-02	1,292E-01
1,8	1,273E-02	1,292E-01	6,553E-02	1,292E-01
2	1,548E-02	1,293E-01	8,437E-02	1,293E-01
2,5	2,350E-02	1,293E-01	1,039E-01	1,294E-01
3	3,319E-02	1,294E-01	1,241E-01	1,295E-01
3,5	4,455E-02	1,296E-01	1,448E-01	1,296E-01
4	5,756E-02	1,297E-01	1,662E-01	1,298E-01
4,5	7,224E-02	1,299E-01	1,880E-01	1,300E-01
5	8,858E-02	1,301E-01	2,103E-01	1,301E-01
6	1,263E-01	1,305E-01	2,331E-01	1,303E-01
7	1,706E-01	1,310E-01	2,564E-01	1,305E-01
8	2,216E-01	1,315E-01	2,801E-01	1,308E-01
9	2,792E-01	1,322E-01	3,042E-01	1,310E-01
10	3,435E-01	1,329E-01	3,287E-01	1,313E-01
12	4,920E-01	1,345E-01	3,536E-01	1,315E-01
14	6,671E-01	1,365E-01	3,789E-01	1,318E-01
16	8,689E-01	1,388E-01	4,045E-01	1,321E-01
18	1,097E+00	1,413E-01	4,305E-01	1,325E-01
20	1,352E+00	1,442E-01	5,379E-01	1,340E-01
30	3,026E+00	1,629E-01	6,504E-01	1,357E-01
40	5,364E+00	1,889E-01	7,676E-01	1,377E-01
50	8,366E+00	2,219E-01	8,893E-01	1,400E-01
60	1,203E+01	2,616E-01	1,015E+00	1,425E-01
80	2,135E+01	3,599E-01	1,700E+00	1,592E-01



$f$ (kHz)	Před validací koeficientů		Po validaci koeficientů	
	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)
100	3,331E+01	4,805E-01	1,884E+00	1,644E-01
120	4,790E+01	6,199E-01	2,074E+00	1,699E-01
140	6,512E+01	7,744E-01	2,267E+00	1,759E-01
160	8,496E+01	9,404E-01	2,466E+00	1,823E-01
180	1,074E+02	1,115E+00	2,668E+00	1,890E-01
200	1,325E+02	1,294E+00	2,875E+00	1,962E-01
250	2,064E+02	1,748E+00	3,086E+00	2,037E-01
300	2,965E+02	2,191E+00	3,301E+00	2,116E-01

## Příloha 11. –Modely navinutých cívek

$f$ (kHz)	cívka 1,25 mm		cívka 0,71 mm	
	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)
0,01	1,934E-04	1,012E-02	1,965E-04	1,045E-02
0,05	9,976E-04	1,012E-02	1,013E-03	1,046E-02
0,1	2,041E-03	1,014E-02	2,072E-03	1,050E-02
0,2	4,210E-03	1,022E-02	4,275E-03	1,064E-02
0,3	6,462E-03	1,035E-02	6,561E-03	1,088E-02
0,4	8,782E-03	1,053E-02	8,914E-03	1,121E-02
0,5	1,116E-02	1,076E-02	1,133E-02	1,164E-02
0,6	1,359E-02	1,104E-02	1,379E-02	1,216E-02
0,8	1,859E-02	1,176E-02	1,885E-02	1,348E-02
1	2,375E-02	1,268E-02	2,406E-02	1,517E-02
1,2	2,905E-02	1,381E-02	2,941E-02	1,721E-02
1,4	3,449E-02	1,513E-02	3,487E-02	1,959E-02
1,6	4,005E-02	1,666E-02	4,044E-02	2,231E-02
1,8	4,571E-02	1,839E-02	4,611E-02	2,534E-02
2	5,148E-02	2,032E-02	5,185E-02	2,868E-02
2,5	6,633E-02	2,601E-02	6,654E-02	3,825E-02
3	8,171E-02	3,291E-02	8,160E-02	4,934E-02
3,5	9,755E-02	4,099E-02	9,695E-02	6,169E-02
4	1,138E-01	5,022E-02	1,125E-01	7,501E-02
4,5	1,305E-01	6,056E-02	1,283E-01	8,904E-02
5	1,474E-01	7,196E-02	1,443E-01	1,036E-01
5,5	1,647E-01	8,437E-02	1,604E-01	1,184E-01
6	1,823E-01	9,776E-02	1,766E-01	1,333E-01
6,5	2,001E-01	1,121E-01	1,930E-01	1,483E-01
7	2,181E-01	1,272E-01	2,095E-01	1,632E-01
7,5	2,363E-01	1,432E-01	2,262E-01	1,779E-01
8	2,548E-01	1,599E-01	2,430E-01	1,924E-01
8,5	2,734E-01	1,773E-01	2,599E-01	2,067E-01
9	2,921E-01	1,954E-01	2,770E-01	2,207E-01
9,5	3,110E-01	2,140E-01	2,942E-01	2,345E-01
10	3,300E-01	2,332E-01	3,116E-01	2,480E-01
12	4,070E-01	3,140E-01	3,829E-01	3,002E-01
14	4,853E-01	3,990E-01	4,568E-01	3,500E-01
16	5,645E-01	4,856E-01	5,334E-01	3,988E-01
18	6,444E-01	5,715E-01	6,125E-01	4,477E-01
20	7,250E-01	6,553E-01	6,940E-01	4,973E-01
30	1,140E+00	1,017E+00	1,132E+00	7,666E-01

$f$ (kHz)	cívka 1,25 mm		cívka 0,71 mm	
	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)	$\Delta P_{FE}$ (mW)	$\Delta P_W$ (mW)
32,5	1,248E+00	1,091E+00	1,248E+00	8,397E-01
35	1,358E+00	1,160E+00	1,366E+00	9,147E-01
37,5	1,470E+00	1,223E+00	1,486E+00	9,912E-01
40	1,583E+00	1,282E+00	1,608E+00	1,069E+00
42,5	1,699E+00	1,337E+00	1,732E+00	1,148E+00
45	1,817E+00	1,388E+00	1,857E+00	1,227E+00
47,5	1,937E+00	1,437E+00	1,984E+00	1,307E+00
50	2,059E+00	1,482E+00	2,112E+00	1,386E+00
55	2,310E+00	1,566E+00	2,373E+00	1,544E+00
60	2,568E+00	1,644E+00	2,639E+00	1,700E+00
80	3,678E+00	1,909E+00	3,749E+00	2,275E+00
100	4,896E+00	2,138E+00	4,934E+00	2,758E+00
150	8,344E+00	2,642E+00	8,224E+00	3,642E+00
200	1,227E+01	3,080E+00	1,196E+01	4,269E+00
250	1,662E+01	3,467E+00	1,609E+01	4,783E+00
300	2,134E+01	3,817E+00	2,059E+01	5,242E+00