

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MEŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

WPT systém s vazebným prvkem v “double-D“ zapojení

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku bezdrátového přenosu energie za pomoci dvou páru cívek. Tento systém zapojení se nazývá double D a je uvažován jako systém používaný v dopravě jelikož je schopný přenášet energii mezi primární a sekundární stranou za jízdy. První část práce popisuje základní informace o bezdrátovém přenosu energie a double D. V druhé části jsou uvedeny parametry double D, které ovlivňují vlastnosti jako je činitel vazby, účinnost a dosažený výkon. Dále je proveden návrh vlastního uspořádání a jsou nasimulovány výsledky, jako jsou právě činitel vazby, účinnost nebo rozptylový tok. Tento návrh je následně optimalizován, aby splňoval podmínky ICNIRP. Jako další bod jsou nastíněny základní náklady na stavbu tohoto systému. V závěru jsou shrnuty výsledky a porovnány běžným řešením.

Klíčová slova

Bezdrátový přenos energie, double D, rezonance, cívka, činitel vazby, rozptylový magnetický tok, magnetický tok, ferit, vyosení, účinnost.

Abstract

This diploma thesis is focused on the issue of wireless power transfer with using two couple of coils. This system is called double D and is considered as transport system because it is capable transferring energy between the primary and secondary side while driving. The first part describes the basic information about wireless power transfer and double D. In the second part are described the double D parameters, which affect the properties such as coupling coefficient, efficiency and achieve output power. In addition, own design is made and results such as coupling coefficient, efficiency or leakage magnetic fields are simulated. Subsequently this own design is optimized to meet ICNIRP conditions. The next part describes the basic cost of this system. In conclusion, the results are summarized and compared with the common solution.

Key words

Wireless power transfer, double D, resonance, coil, coupling coefficient, leakage magnetic fields, magnetic fields, ferrite, misalignment, efficiency.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 24.5.2018

Bc. Tomáš Veselý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Vladimírovi Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD.....	9
1 INDUKČNÍ PŘENOS ENERGIE	10
1.1 KONCEPT IPT	10
1.2 POUŽITÍ IPT PRO ELEKTRICKÁ VOZIDLA (EV)	11
1.3 STRUKTURY IPT	12
1.4 ZÁKLADNÍ PRINCIPY IPT	15
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	18
2.1 VYOSENÍ.....	18
2.2 ZAVEDENÍ NOVÉ METRIKY	20
2.3 VYŠETŘOVÁNÍ POČTU A ROZTEČE ZÁVITŮ	20
2.4 ROZESTUP MEZI FERITY	22
2.5 ŠÍŘKA A DÉLKA VAZEBNÝCH CÍVEK.....	22
2.6 DÉLKA FERITOVÝCH TYČÍ.....	23
2.7 ZMENŠENÍ ROZPTYLOVÉHO POLE.....	23
2.8 ODEBRÁNÍ FERITŮ	25
3 NÁVRH VLASTNÍHO USPOŘÁDÁNÍ	28
3.1 NÁVRH ROZMĚRŮ VAZEBNÝCH PRVKŮ	28
3.2 FYZIKÁLNÍ MODEL.....	28
3.3 VÝPOČETNÍ MODEL.....	29
3.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	30
3.5 VÝSLEDKY ROZPTYLOVÉHO TOKU	36
3.6 VÝSLEDKY PŘI ZMĚNĚ ZÁTĚŽE	38
3.7 OPTIMALIZACE MODELU	39
3.8 SYSTÉM O VÝKONU 11 kW	43
4 NÁKLADY NA VAZEBNÉ PRVKY	47
5 ZÁVĚR.....	48
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
PŘÍLOHY.....	51

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Význam
k	Činitel vazby
M	Vzájemná indukčnost
L_1, L_2	Vlastní indukčnost primární a sekundární cívky
φ_{ip}	Vzájemný tok
I_1	Primární proud
ω	Úhlová frekvence
U_{OC}	Napětí naprázdno
I_{SC}	Proud nakrátko
S_U	Zdánlivý výkon
P_{OUT}	Maximální přenesený výkon
Q	Činitel jakosti
B_{RMS}	Maximální rozptylové pole
r_s	poměr mezery ku šířce feritu
r_f	poměr délky feritů ku délce cívek
U_{in}	Napětí zdroje
B	Hustota magnetického toku
f	Frekvence
S	Plocha
L_{11}, L_{12}	Vlastní indukčnost primárních cívek
L_c	Vlastní indukčnost cívek
Symbol	Význam
IPT	Induction power transfer
EV	Elektrické vozidlo
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
DD.....	Double D
BMS	Battery Management System
MMF	Indukované napětí

Úvod

Indukční přenos energie (dále jen IPT) byl navržen krátce po té, co Ampere a Faraday navrhli své zákony, které jsou dnes základem elektrotechniky. Následně na to, nejvýznamnější pokrok učinil Tesla, který demonstroval přenos energie pomocí vysokofrekvenčně laděných cívek. Avšak tehdy nebyla dostatečná technologie, abychom dosáhli dostatečného výkonu, účinnosti a nízké ceny. Proto se od IPT systémů upustilo a do popředí se opět dostaly až v 90. letech 20. století a během posledních 20 let se dále rozvíjely. IPT zahrnuje spárování minimálně 2 cívek: proud v primární cívce způsobuje indukované napětí v druhé cívce, a tak za správných podmínek může být napětí využito k napájení různých aplikací. Při těchto okolnostech pak můžeme mluvit o přenosu energie indukci z jedné cívky do druhé bez fyzického kontaktu. Takový přenos je schopný způsobit převrat mnoha výrobních procesech. Jelikož vodiče na sobě mohou mít izolaci, je provozování systému možné i ve vlhkém a špinavém prostředí bez jakéhokoli snížení bezpečnosti. Vzhledem k absenci fyzického kontaktu proces nevyžaduje žádný zásah uživatele ani žádné pohyblivé mechanické součásti. Proto je systém IPT velmi pohodlný, bezpečný a má využití v mnoha aplikacích, kde dochází k manipulaci se zařízením, jako například u bezdrátového dobíjení baterií malých zařízení (mobilní telefon, kardiostimulátor,...), ale i velkých zařízení jako jsou elektrická vozidla (dále jen EV). Nabíjení těchto vozidel se může objevit na různých místech jako je garáž, parkoviště u obchodů, pracovišti a mnoha dalších místech. [1], [2], [3], [4]

1 Indukční přenos energie

1.1 Koncept IPT

IPT koncept je velmi podobný transformátorům, jelikož vzájemného spojení dosahuje obdobně. IPT přenáší energii pomocí magnetického pole mezi dvěma vzduchem oddělenými cívkami. IPT na rozdíl od transformátoru má malou hodnotu činitele vazby k . Činitel vazby k je poměr toku, který se uzavírá přes obě cívky s celkovým tokem vytvářeným vysílací cívkou. Hodnota činitele vazby u IPT systémů je okolo 0,01-0,5 z důvodů vzduchové mezery na rozdíl od transformátoru, jehož hodnota je přibližně 0,95. Činitel vazby lze snadno stanovit měřením M , L_1 a L_2 pomocí LCR metru. Vzájemná indukčnost je velmi závislá na vzdálenosti mezi cívkami a vzdálenosti mezi středy cívek a tím i činitel vazby je závislý na vzájemné poloze. IPT systémy mají sami o sobě nízkou hodnotu účinnosti, což ovlivňuje celkové množství činného výkonu. Pro snížení zdánlivého výkonu je nezbytné použití kompenzačního obvodu cívky, který maximalizuje přenos činného výkonu. Tento stav nastane pouze při rezonanční frekvenci a je při ní přenesená maximální energie. Přenesená energie může být zvýšena působením činitele vazby, provozní frekvencí a kompenzačním obvodem cívky. Nejdůležitějším parametrem pro IPT je účinnost přenosu energie. Dále je velmi důležitá hodnota rozptylového pole, která musí splňovat bezpečnostní standardy Mezinárodní komise pro ochranu před neionizujícím zářením (ICNIRP). [2], [3], [4], [5]

Pro zajištění co nejúčinnějšího přenosu energie přes IPT musí být současně splněno několik podmínek. Při nedodržení těchto podmínek, výrazně klesá účinnost IPT systémů. Mezi hlavní podmínky patří: [6]

1. cívky musí být vzájemně kompatibilní
2. cívky musí pracovat se stejnou jmenovitou frekvencí
3. výkonová úroveň obou cívek musí být navržena tak, aby byla kompatibilní a podobného výkonu - primární strana o výkonu 100 kW nelze použít pro připojení sekundární cívky o výkonu 2 kW s očekáváním vysoké účinnosti a nízkými ztrátami, ačkoli primární systém o výkonu cca 20 kW může být schopen dosáhnout dobrých výsledků se stejným sekundárním výkonem 2 kW, pokud se s tím počítá už ve fázi návrhu. [6]

1.2 Použití IPT pro elektrická vozidla (EV)

Pro uplatnění IPT u EV se používají 2 páry vazebných cívek, z nichž jeden pár je zabudován v zemi a druhý v podvozku vozidla. Tyto cívky jsou vázány magnetickou vazbou, která je geometrickou vlastností magnetických a elektrických obvodů: vazebné prvky dosahují spojení v závislosti na jejich konstrukci. Pokud je konstrukce navržena špatně, je potřeba obvody dále kompenzovat, což přináší další komplikace. Pokud energii přenášíme, když vozidlo s baterií stojí, nazýváme to stacionárním nabíjením baterie vozidla. Nabíjení je považováno za speciální typ provozu IPT, kde koncovým uživatelem je systém řízení baterie (BMS), který ovládá nabíjení baterie. Pokud se energie přenáší, když se vozidlo pohybuje, nazýváme to dynamickým nabíjením/napájením. Zatímco koncept byl vyvinut v 70. letech, teprve nedávno se této technologii začala věnovat pozornost a to i díky ochotě výrobců automobilů podporovat tuto technologii. Pokud by tyto systémy měli být použity v praxi, je potřeba zajistit dostačující životnost vazebných členů a jejich kompatibilitu mezi různými dodavateli a výrobcí automobilů. Výzkum tohoto systému tedy spočívá nejen v určení nejlepší topologie, frekvence, volbě velikosti magnetických prvků pro různé aplikace atd, ale i ve vývoji vhodných materiálů pro zajištění životnosti kolem 20 let (životnost silnic v ČR). [1], [5], [6]

Stacionární nabíjení umožňuje zaparkování nad nabíjecími cívkami a BMS se automaticky připojí, aniž by uživatel musel cokoli udělat. Za schopnost průměrného řidiče zaparkovat přesně nad daný bod se považuje zóna o průměru 400 mm. Z toho vychází tolerance při vychýlení z osy a požadavky na nabíjecí zóny. Byly by možné i menší zóny ale byl by už vyžadován automatický naváděcí systém. Z toho vyplývá, že pro efektivní nabíjení s minimálním rozptylovým tokem musí být vozidlo zaparkováno tak, aby byly obě podložky v relativně těsné blízkosti. Při nabití baterie se pak systém automaticky odpojí. Při dynamickém režimu je energie přenášena za jízdy podél cesty, ve které je umístěno vinutí. To vytváří magnetický tok, který sekundární vinutí zachytí. Takto poháněná vozidla pak nepotřebují dlouhé nabíjecí časy. Navíc vozidlo s sebou nevozí "mrtvou váhu" v podobě cívek pouze pro stacionární nabíjení. Energie by proudila ze silnice do vazebných cívek umístěných v podvozku a z něj přes usměrňovač a další řídicí obvody přímo do baterií nebo motorů kol, kde by baterie obcházela. Tím navíc můžeme dosáhnout vyšší účinnosti, jelikož nabíjením může dojít až k 10%-20% ztrátám při přenosu energie do a z baterií. [1], [2], [6]

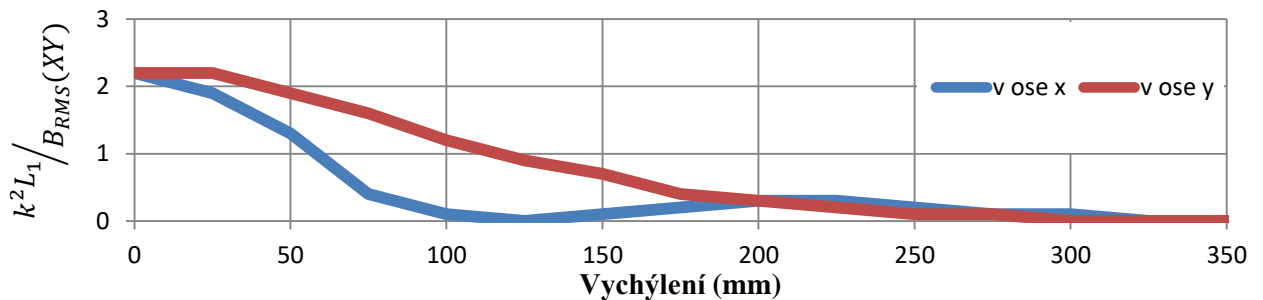
U těchto systémů, vazebné cívky umístěné v silnici musí přenést energii do cívek ve vozidle cca 200 mm vzdáleného, s možným posunem až 200 mm v libovolném směru. Očekává se, že když je vozidlo v pohybu, vazebné prvky vozidla budou neustále zasahovat předměty z povrchu vozovky, jako jsou kameny, bláto, led atd. Přesto však musí udržovat svůj výkon a účinnost kolem 90 %. Tyto prvky musí přežít extrémní podmínky, které se mohou pod vozidlem vyskytovat, včetně teplot od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu životnosti několika let. Proto cívky potřebují ochranný kryt, který je na straně vozidla obvykle polyuretanový. Cívky zabudované v zemi potřebují zvláštní zesílenou ochranu, jelikož vozidla přes něj budou přejíždět a mohla by poškodit křehké feritové jádro. [1], [6]

1.3 Struktury IPT

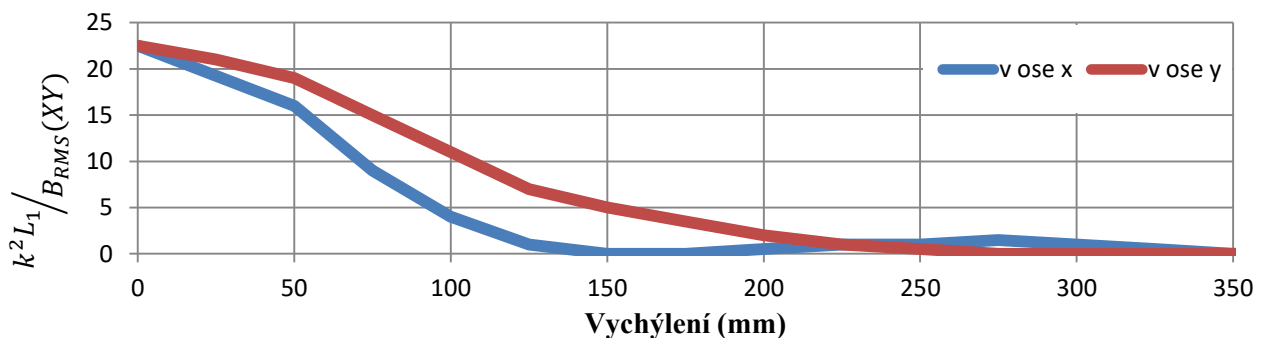
Nejběžnější IPT systémy používají identické vysílače a přijímače s kruhovou magnetickou strukturou. Takové cívky jsou vhodné pro stacionární nabíjení a přijatelnou hodnotu činitele vazby mají ve výšce 4x nižší než je průměr samotné cívky. Systémy s touto strukturou však mají vysokou hodnotu rozptylového pole a špatnou toleranci vůči horizontálnímu posunu, což vede ke zvětšování jejich průměrů, tím pádem ke zvyšování nákladů. Tyto vazebné cívky nejsou tedy vhodné pro dynamické nabíjení, protože při přechodu z jedné cívky do další nastává nulový přenos energie. Proto bylo navrženo několik dalších struktur, které jsou schopny vytvořit horizontální tok, zvané polarizované. Tyto struktury mají přijatelnou hodnotu činitele vazby ve výšce 2x nižší než je jejich délka. Polarizované vazebné prvky tedy mohou mít při stejných podmínkách menší rozměry než nepolarizované kruhové. Velikost cívek by měla brát v úvahu typ aplikace. V případě vozidel bychom měli počítat se vzduchovou mezerou okolo již zmíněných 200 mm, od které se dále odvíjí šířka a délka, jež musí být kompatibilní s vozidlem. [2], [5]

Jednou z těchto struktur je právě řešený double D (DD, double-D Pad, DDP), který můžeme vidět na obrázku 3. Tyto polarizované cívky se vyvinuly z kruhové cívky ve snaze dále vylepšit magnetickou vazbu a redukovat rozptylové pole. Vazebné prvky DD se skládají ze 2 párů spirálových cívek, zapojeny elektricky paralelně a magneticky sériově, aby se zvýšilo magnetické pole a snížila indukčnost. Ve vinutí cívek vznikají vysokofrekvenční ztráty, které jsou způsobeny skin efektem. Nicméně pokud použijeme lankový drát, tento efekt je minimalizován a ztráty ve vinutí jsou ovlivněny už jen rezistivitou, průřezem a délkou vodiče. Cívky jsou umístěny na feritových tyčích, abychom dosáhli snížení reluktance

systemu (magnetického odporu) a pro zvýšení vazby. Dalším důvodem umístění cívek na ferity je snaha usměrnit hlavní tok směrem nahoru k přijímači, takže ideálně vzniká jednostranná cesta toku (to znamená, že za vysílačem nedochází k toku směrem dolů). Z obrázků 1 a 2 můžeme vidět, jak samotné přidání feritů velmi sníží celkový rozptylový tok B_{RMS} . [1], [2], [3], [4], [5], [7]



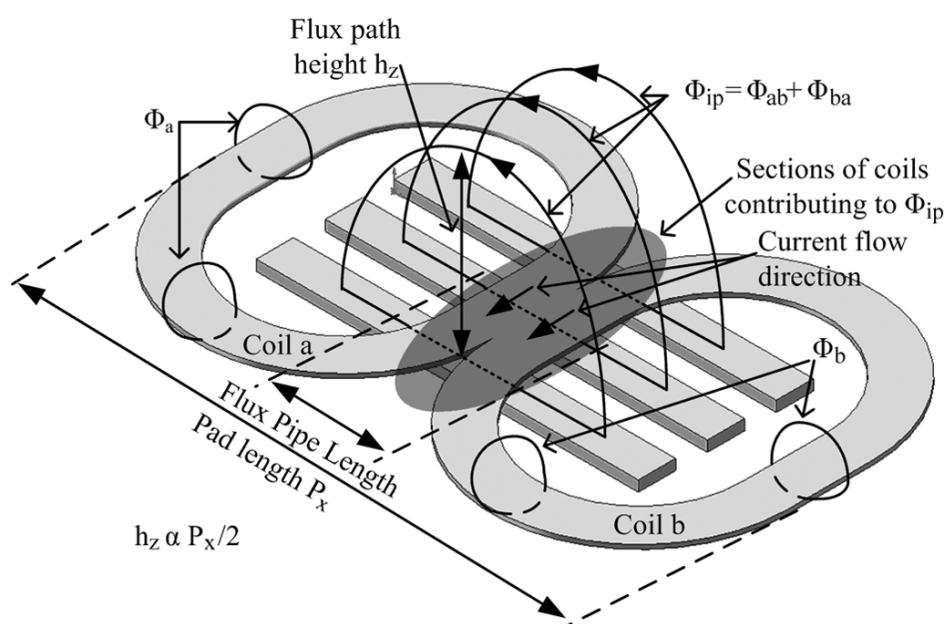
Obr. 1 Křivka rozptylového toku B_{RMS} DD bez feritových tyčí [4]



Obr. 2 Křivka rozptylového toku B_{RMS} DD s přidávanými feritovými tyčemi [4]

Pod ferity je umístěna hliníková podložka, která slouží pro stínění jakéhokoli rozptylového toku, který by směřoval pod vazebný prvek. Také je používáno, aby se zabránilo vířivým proudům v podvozku EV a aby se zmenšilo rozptylové pole ve vozidle. Kromě hliníkového stínění může být použito i měděné. Tím vznikne jednostranný vazebný prvek s výškou dráhy toku úměrnou polovině délky cívek (tj. 2x lepší než u kruhové topologie a je tím zajištěn i lepší činitel vazby). Dřívější práce na kruhových cívkách ukázaly, že pro optimalizaci není potřebná pevná feritová deska. Podobného výkonu může být dosaženo s feritovými tyčemi, které jsou rozděleny vzduchovými mezerami. To je umožněno tím, že se snažíme o co největší hustotu toku ve feritových tyčích, aby bylo zajištěno co největšího využití. Maximální hustota magnetického toku se vyskytuje ve střední části feritů, které jsou umístěny na okraji oblasti uzavřené cívkami. To je způsobeno tím, že do feritů vstupuje jak tok vytvořený střední částí vazebných cívek, tak tok vytvořený vnějšími okraji cívkou. Od toho se odvíjí tloušťka tyčí (respektive počet tyčí), která musí být schopna pojmout tok tak, aby

nedošlo k saturaci. Zároveň však musíme zajistit co nejmenší rozptylové pole. Hustoty toku nad 200 mT zvyšují ztráty jádra a provozní teplotu, nicméně saturace nastane, pouze pokud maximální hustota toku dosahuje 400 mT. Feritové tyče navíc umožňují snížení ceny, hmotnosti a změnu reluktance tak, že jsou více propustné podél feritů a méně propustné napříč ferity. Smysl vynutí cívek je takový, že pokud je jeden pól severní, druhý je jižní. Proto dráha toku φ_{ip} prochází feritem k pólu, který je ve středu cívky, překlene se vysokým obloukem skrz vzduch, respektive sekundárními cívkami do druhého pólu (středu druhé cívky) a vrátí se skrz ferit k výchozímu bodu. Navíc tím zajistíme, že výška dráhy toku φ_{ip} je úměrná polovině délky cívek. [1], [2], [3], [8]

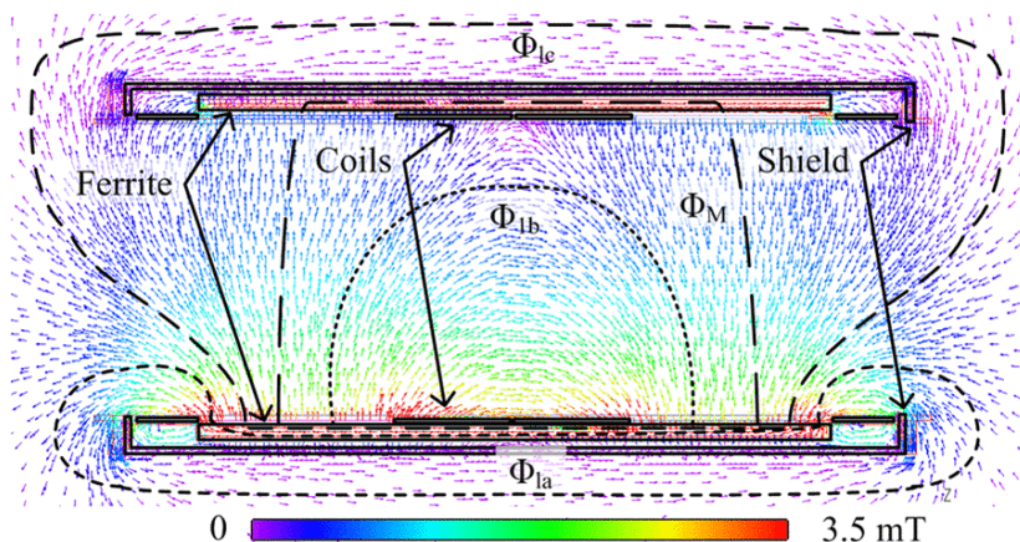


Obr. 3 Double D topologie s vyobrazenými toky, převzato z [2]

Výška vzájemného toku φ_{ip} je řízena úsekem tvořící flux pipe, proto by měl být co nejdelší. Pojem flux pipe vychází ze stejnojmenné struktury. Za flux pipe je považována vystínovaná část cívek a feritů, protože cívky jsou zde uspořádány magneticky sériově a elektricky paralelně a prochází jím hlavní tok. Naopak ostatní části cívky by měly být minimalizovány pro úsporu mědi a snížení R . Výsledkem je, že cívky mají tvar "D", a jelikož tu jsou umístěny tyto cívky dvě zády k sobě, vyplývá z toho název této struktury double D (DD). [2], [6]

DD topologie má velmi žádané vlastnosti pro indukční vazební členy s velkou vzduchovou mezerou. Jedná se o jednostrannou cestu toku způsobující extrémně nízké ztráty

ze zadní strany, průměrnou výšku toku, odpovídající přibližně polovině délky cívek, neovlivnitelnost hliníkovým stíněním a relativně malé rozptylové pole. DD má při vyosení mnohem širší pokrytí v obou směrech. Vzniklý tok ve směru Z je tak vysoký, že je vhodný pro statické nabíjení při menších rozměrech vazebných prvků, než které by byly potřeba u kruhových prvků. Kromě toho je DD ideální také pro dynamické nabíjení. [1], [2]



Obr. 4 Řez Double D s vyobrazenými toky [2]

1.4 Základní principy IPT

V nejjednodušší formě, IPT obsahuje 2 cívky L_1 a L_2 se vzájemnou indukčností M . Pro proud I_1 tekoucí cívkou L_1 při frekvenci ω , lze indukované napětí na L_2 vyjádřit jako:

$$U_{OC} = j\omega MI_1 \quad (1)$$

a je běžně uváděno jako napětí systému na prázdko. Pokud je sekundární strana zkratována a zanedbáme odpor vodičů, zkratový proud je: [1]

$$I_{SC} = \frac{U_{OC}}{Z} = \frac{j\omega MI_1}{j\omega L_2} = \frac{MI_1}{L_2} \quad (2)$$

Z prvních principů můžeme vyjádřit maximální zdánlivý výkon S_U jako:

$$S_U = I_{SC} U_{OC} = \omega MI_1 \frac{MI_1}{L_2} = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} \quad (3)$$

Jak již bylo zmíněno, činitel vazby lze snadno stanovit z M , L_1 a L_2 a to za pomoci vztahu: [4]

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4)$$

Po dosazení rovnice (4) do rovnice (3) dostaneme: [4]

$$S_U = \omega I_1^2 \frac{k^2 L_1 L_2}{L_2} = \omega (k^2 L_1) I_1^2 \quad (5)$$

Maximální výkon, který systém dokáže přenést, nazýváme P_{OUT} a je roven: [1]

$$P_{OUT} = S_U Q_2 = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} Q_2 \quad (6)$$

U systému v rezonanci můžeme říct, že účinník je roven 1 a proto se P_{OUT} může rovnat S_U . Q_2 je provozní činitel jakosti sekundárního vazebného prvku. Činitel jakosti lze vyjádřit jako poměr jalové energie rezonančního obvodu ku činnému výkonu dodávaným zdrojem. Také lze stanovit jako poměr rezonančního napětí na cívce ku napětí na zdroji. Vysoký činitel jakosti je velmi důležitý pro zajištění vysoké účinnosti i při nízkých hodnotách k . Provozní Q_2 se vlivem tolerance na vychýlení, degradace a jiných pohybuje v rozmezí od 4 do 6. [1], [10], [11]

Maximální výkon lze také napsat na základě U a I na vstupních svorkách vysílacích cívek, vazebného činitele a činitele jakosti odvozením z rovnice (6): [2]

$$P_{OUT} = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} Q_2 = \omega I_1^2 \frac{k^2 L_1 L_2}{L_2} Q_2 = \omega L_1 I_1^2 k^2 Q_2 \quad (7)$$

Zanedbáme-li odpor přívodních vodičů, můžeme napsat že:

$$Z = X_L = \omega L_1 \Rightarrow \omega L_1 I_1 = U_{in} \quad (8)$$

A z toho můžeme dále odvodit:

$$P_{OUT} = \omega L_1 I_1 I_1 k^2 Q_2 = U_{in} I_1 k^2 Q_2 \quad (9)$$

Maximální účinnost IPT systému je běžně udávána jako: [9]

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (10)$$

Kde Q_1 a Q_2 jsou činitele jakosti primární a sekundární cívky. Z této rovnice můžeme vidět, že dobré účinnosti můžeme dosáhnout i s malým k , za předpokladu, že oba činitelé jakosti budou vysoké. [9]

Hustota magnetického toku vytvořená vazebnými cívkami je určena frekvencí a amplitudou, tvarem samotné cívky a strukturou feritů. Standardní jednotkou pro hustotu magnetického toku je Tesla, která může být vyjádřena jako: [12]

$$B = \frac{U}{fS} \quad (11)$$

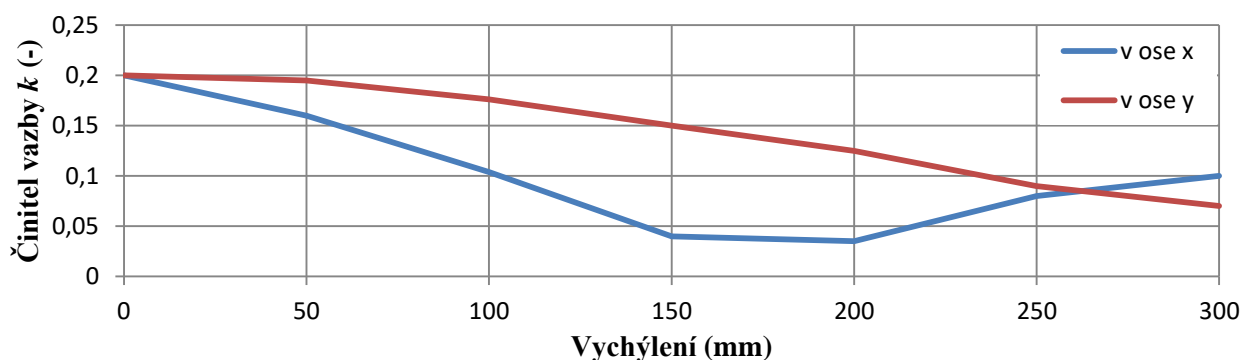
Kde S je plocha, kterou tok protéká. Z toho vyplývá, že pro danou strukturu a výkon, při zvýšení pracovní frekvence se rozptylové pole zmenší. Opačný vztah platí pro napětí. Zvýšené napětí způsobí poměrné zvýšení hustoty toku. [12]

2 Současný stav problematiky

2.1 Vyosení

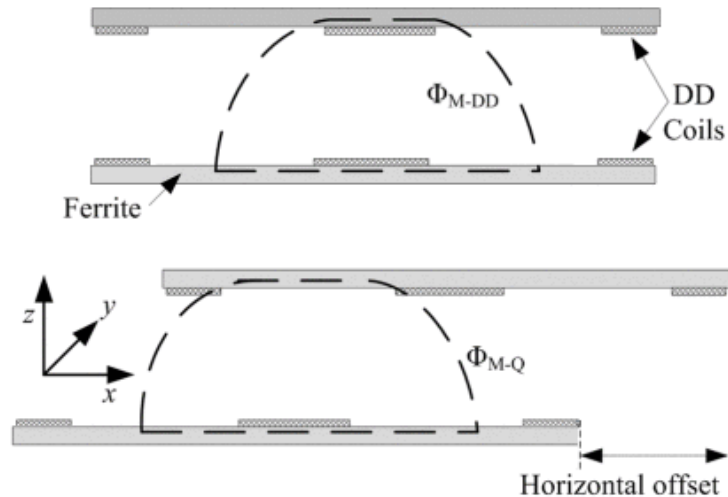
Vazebné prvky by měly být schopny spárovat požadovanou úroveň výkonu v rámci určitých mezí. Typické tolerance vyžadují až 200 mm vzduchovou mezeru a více než ± 200 mm v horizontálním vychýlení. Vazebné prvky jsou charakterizovány výkonovými a vazebnými profily, které se měří za podmínek, kdy vysílací cívkou protéká jmenovitý proud. Měření napětí a proudu se pak provádí na přijímacích cívkách, když je poloha ustálena ve známé výšce (vzduchová mezeru) a pohybuje se vodorovně ve směru X a Y ve vztahu k vysílači. Jelikož DD není symetrický (jako kruhová topologie), je potřeba tyto profily měřit ve dvou směrech. Jeden je v ose délky (směr X) a druhý v ose šířky (směr Y). [2]

Simulace a naměřené výsledky systému DD ukazují, že výkon podél osy X není tak dobrý jako v ose Y. Graf závislosti činitele vazby na vychýlení můžeme vidět na obrázku 5. To je způsobeno poklesem přenesené energie, ke kterému dochází, když je horizontální posunutí cca 34 % délky podložky v ose X. Všimněme si, že na rozdíl od směru Y nastává při vyosení kolem 125 mm ve směru X pokles vazebného činitele téměř k nule, což vede právě i k poklesu přenesené energie. Při vyosení cívek ve směru X totiž klesá vazebný činitel vazby mnohem rychleji než ve směru Y. To je důsledkem menší uzavřené oblasti cívek, které se již při malém posunu cívky podstatně méně překrývají. Tím je navíc způsobeno, že jeden z primárních pólů DD bude mít sníženou vazbu se sekundární cívkou, čímž dojde ke zvýšení hustoty toku a tím se zvýší i rozptylový tok do okolí. Jak můžeme vidět z obrázku 6, v této poloze tok vstupuje a vystupuje ze stejné cívky, což má za následek nulové indukované napětí. Druhá cívka je příliš vzdálená od vysílače, takže jí protíná jen minimální magnetický tok. To ukládá základní toleranci pro osu X. [2], [3], [4], [12]



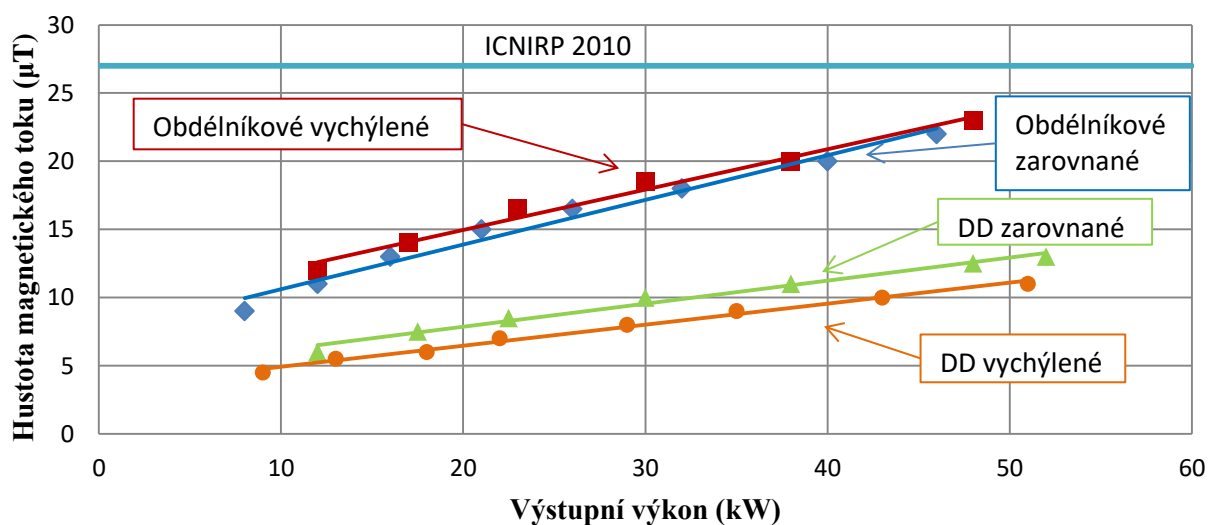
Obr. 5 Činitel vazby k při vychýlení [3]

Cívky v zapojení DD fungují dobře, pokud jsou cívky vyoseny ve směru Y. Vzhledem k tomu, že při parkování potřebujeme zajistit dostatečnou toleranci ve směru Y, DD se jeví jako dobrá volba. Stejně tak díky dobré toleranci a nízké hodnotě rozptylového toku ve směru Y, je DD vhodný i pro dynamické systémy. [4]



Obr. 6 Magnetický tok vstupující a vystupující z jedné cívky [2]

Podle výpočtů FEM, hlavní výhodou geometrie DD je menší rozptylové magnetické pole. Hodnota rozptylového magnetického pole je přibližně 2x menší než u obdélníkové cívky v celém rozsahu výkonu. Menší rozptylové magnetické pole je zapříčiněno tím, že celá dráha reluktance je součástí struktury cívky, na rozdíl od kruhové (obdélníkové), kde i okolní prostředí je částí magnetického obvodu. [3]



Obr. 7 Unikající tok v rozsahu výkonů [3]

Měření hustoty magnetického toku je prováděno ve vzdálenosti 800 mm ve směru Y, od středu vysílací cívky (vzdálenost, kde prototyp obdélníkového vinutí splňuje ICNIRP2010). Zároveň tato vzdálenost reprezentuje stranu vozidla. Tím napodobujeme skutečnou situaci, kdy se v této vzdálenosti mohou pohybovat lidé. [3], [9]

DD má oproti obdélníkové topologii o stejné ploše přibližně o 0,5 % horší účinnost a při stejné hmotnosti horší přibližně o 1 %. Oba účinky jsou způsobeny zvýšenými ztrátami v jádře, které jsou důsledkem zvýšené hustoty toku ferity. Na druhou stranu hodnota rozptylového pole je mnohem lepší. Experimenty potvrzují tuto jasnou výhodu topologie DD. Pro praktický systém je třeba analyzovat, zda jsou omezujícími faktory ztráty výkonu, tolerance polohy nebo rozptylové pole. [3]

Vliv rozměrů vazebných cívek na rozptylové pole při vyosení a na činitele vazby a výkon je řešen v následujících podkapitolách.

2.2 Zavedení nové metriky

Protože nekompensovaný výkon S_U je úměrný $k^2 L_I$, je tento vztah použit pro indikaci toho, kolik může být přeneseno energie nezávisle na primárním proudu a frekvenci. Pro jasnější vyjádření vztahu mezi přenesenou energií a rozptylovým polem, zavádíme novou metriku $k^2 L_I / B_{RMS} (XY)$, která vyhodnotí schopnost přenosu energie pro daný rozptylový tok, kde B_{RMS} je maximální celkové rozptylové pole. [4]

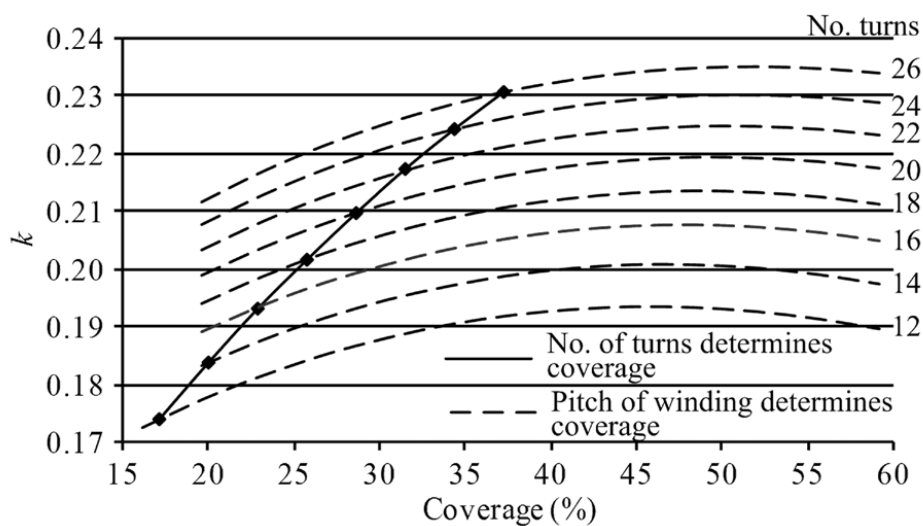
Poměr $k^2 L_I / B_{RMS} (XY)$ je užitečný pro výpočty statického nabíjení, kdy se lidé mohou pohybovat okolo vazebných prvků, zatím co poměr $k^2 L_I / B_{RMS} (Y)$ je užitečný pro prvky uložené ve vozovce, kde se lidé pohybují pouze po straně vozovky. [4]

2.3 Vyšetřování počtu a rozteče závitů

Pokud šířka vinutí flux pipe je malá, je reluktance mezi cívkami vysílacího nebo přijímacího vinutí menší v důsledku kratší cesty magnetické dráhy. Pokud ale bude šířka příliš malá, dojde k magnetickému zkratování a tím ke snížení činitele vazby. Proto je u DD žádoucí zvýšit délku flux pipe. Délka flux pipe a tudíž i účinnost jsou dány pokrytím střední části. To je vyjádřeno jako procento pokrytí feritů cívkou tvořící flux pipe a závisí na počtu a rozteči závitů cívky. Úzké cívky se závity blízko u sebe zužují flux pipe, což snižuje vazbu

s přijímačem, což má dále za následek snížení přenesené energie. Na druhou stranu pokud závity budou navinuty s velkou roztečí, tok bude proudit v mezerách mezi závity, což povede ke zkrácení dráhy magnetického toku. Navíc, při zvětšování roztečí, roste i kapacita mezi jednotlivými závity. Tato kapacita může být sice malá, ale může způsobovat komplikace jako např. snížení provozního činitele jakosti Q . Zvýšení počtu závitů má sice žádoucí účinek na zvýšení délky flux pipe, nicméně to vede ke zvýšení indukčnosti. Dále nadměrné množství mědi zvyšuje hmotnost a cenu. Z toho je zřejmé, že optimální pokrytí střední části je dáno kombinací počtu závitů a šířky. [2], [3], [4]

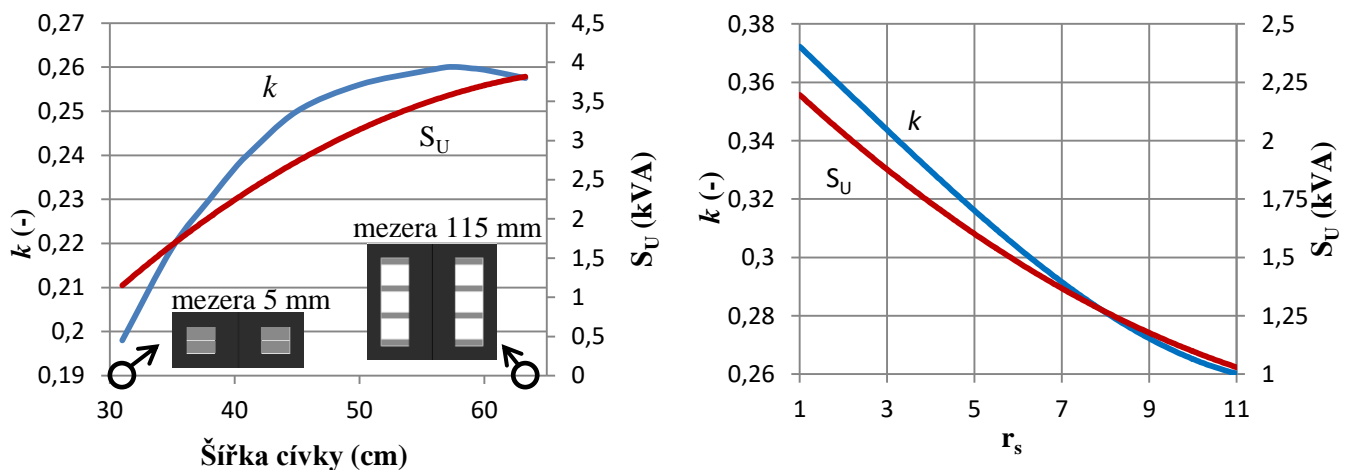
Z obrázku 8 můžeme vidět, že při prodloužení flux pipe dosažením zvětšováním vzdáleností mezi jednotlivými závity, získáme nejvyšší činitel vazby při krytí kolem 50 %. Rozměry šířky vnějších závitů zůstaly zachovány. Na druhou stranu nejvyšší výkon je přenesen při krytí kolem 25 %. Nicméně cívky s vyšším činitelem vazby jsou preferovanější i přes mírný pokles přeneseného výkonu, protože pro přenos stejného výkonu je zapotřebí menšího MMF. Při prodloužení flux pipe dosažením přidáním závitů činitel vazby roste, ovšem už je na uvážení zda se nám vyplatí tento nárůst v poměru s navýšenou cenou, hmotností atd. [2]



Obr. 8 Poměr činitele vazby a překrytí flux pipe, převzato z [2]

2.4 Rozestup mezi ferity

Původní podložky byly navrženy tak, aby vzdálenost byla přibližně dvojnásobná než šířka feritu. Při vyšetřování rozestupu feritů však bylo zjištěno, že nejlepší činitel vazby byl při hodnotě cca 95 mm. U těchto výsledků však nebylo přihlédnuto k samotnému rozšiřování cívek spolu s mezerami, které vede ke zvyšování k . Další výzkum, kde vnější rozměry zůstaly konstantní a měnil se pouze rozestup, zavedl pro objektivní porovnání poměr mezery mezi ferity ku šířce samotného feritu r_s . S rostoucím r_s parametry k a S_U téměř lineárně klesají. To je způsobeno tím, že širšími mezerami unikne více rozptylového toku. Proto na základě aplikace je třeba zvolit vhodný kompromis mezi úsporou materiálu a lepšími vlastnostmi. Graf prvního a druhého výzkumu můžeme vidět na následujícím obrázku 9. [2], [10], [12]



Obr. 9 a) Poměr činitele vazby a výkonu ku šířce cívek [2]

b) Poměr činitele vazby a výkonu ku r_s [10]

2.5 Šířka a délka vazebných cívek

Cílem je zajistit, aby cívky nabízely pro daný rozměr nejlepší vazbu, ale pokud je vazba stále nedostačující pro dosažení požadovaného přenosu výkonu, je možné rozměry, které mají největší míru změny k , aby byly zvětšeny. Při zvětšující se délce, se zvyšuje i činitel vazby k i s výkonem S_U . K největší změně k dochází do délky 1,5 m, poté prodlužování už nepřináší významný zisk. Proto jsou pro lepší činitel vazby na jednotku délky lepší kratší vazebné prvky, ale nebudou schopny přenést vyšší výkony. Pokud vazebné cívky budeme prodlužovat, musíme přidávat i bloky feritových tyčí. Nicméně problematika poměru feritů a délky cívek je řešena v následující podkapitole. Dále se musí dbát na to, aby šířka cívek byla zvolena tak, aby oblast, která je uzavřena cívkami, byla dostatečná pro zachycení magnetického toku.

Největší změna činitele vazby je mezi 0,25 – 0,75 m šířky. Další rozšiřování přináší už jen malý zisk. Činitel vazby k a výkon S_U jsou citlivější na změnu délky než šířky. [2], [10]

Ze simulace bylo zjištěno, že nejlepšího poměru $k^2 L_I / B_{RMS} (XY)$ dosáhneme, pokud poměr délky a šířky cívek bude 3:2. Zároveň se zvýší i přenesený výkon. Tyto rozměry byly pak dále zmenšovány. Bylo zjištěno, že zmenšování má malý vliv na poměr: $k^2 L_I / B_{RMS} (XY)$. Ovšem $k^2 L_I$ klesá úměrně se snižováním rozměrů. Z toho lze odvodit, že pro malé snížení velikosti cívky se přenesený výkon a rozptylový tok sníží o úměrně stejnou hodnotu. [4]

2.6 Délka feritových tyčí

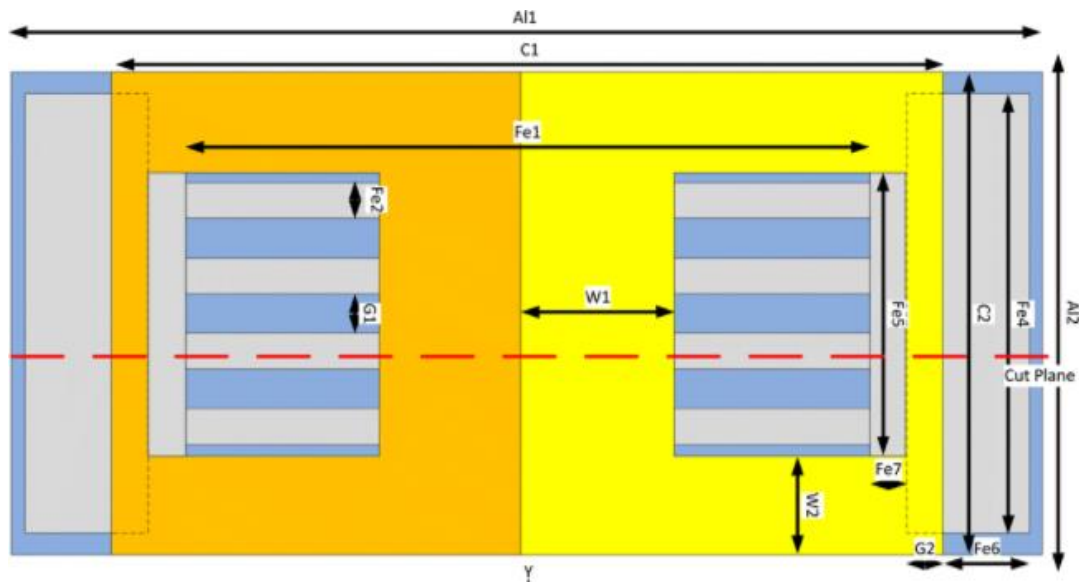
Cílem je zjistit jaký má vliv délka feritů na získané k a S_U . Pro porovnání opět definujeme poměr r_f jako poměr délky feritů ku celkové délce cívek. Výsledkem je, že s rostoucím poměrem roste i k a S_U . Do hodnoty r_f 0,7 rostou lineárně, od této hodnoty se růst zpomalí, z čehož můžeme usoudit, že délka feritů 70 % délky cívek je uspokojivá. Navíc se zvýší robustnost, jak bude popsáno v podkapitole níže. Na druhou stranu vyplývá otázka, jaké hodnoty bude dosahovat vzniklý rozptylový tok jak při zarovnaných vazebných prvcích, tak při vyosení. [10]

2.7 Zmenšení rozptylového pole

Rozptylový tok je tok, který neprochází jak primárním, tak sekundárním vazebným prvkom. Nejčastěji vzniká na okraji cívek. Pokud ferity prodloužíme tak, aby byly delší než cívky, magnetický tok v blízkosti okrajů bude přitahován k feritům, místo aby se rozšiřoval do okolí. Limity pro vystavení magnetického toku na lidi jsou dány ICNIRP a jsou 27 μ T pro frekvence 3-100kHz. [12]

Aby se snížila hustota rozptylového toku systému IPT, byla navržena nová konstrukce feritů ve tvaru kosti. Tvar konstrukce nového jádra můžeme vidět na obrázku 10. Ta přidává další ferity do stávajícího feritové jádra. Tyto ferity by měly být přidány tak, aby přitáhly vytvořený rozptylový tok a zároveň nesnížily vazbu se sekundárním vazebným prvkom. Původní délky feritů je třeba prodloužit a na konce těchto feritů přidat kolmo další, aby splňovaly nové "kostní" feritové jádro. Ze simulací rozšiřování těchto kolmých feritů u vysílací cívky bylo zjištěno, že rozptyl magnetického toku klesá. Pokud se ovšem tyto ferity

rozšíří příliš, může dojít k mírnému zvýšení rozptylového toku. To je způsobeno tím, že při velké šířce je umožněna snadnější cesta hlavnímu toku. [12]



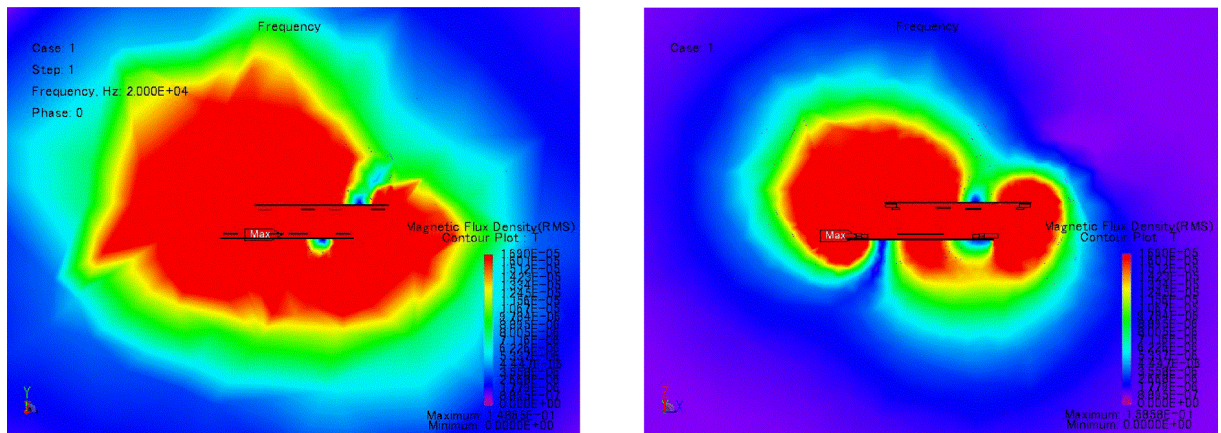
Obr. 10 Kostní feritové jádro, převzato z [12]

Při rozšíření sekundárních feritů, při zarovnaných vazebných prvcích, přenesený výkon mírně klesá. Při vychýlení se ovšem tento pokles ztrácí a výkon je srovnatelný s původní strukturou. Avšak z pohledu rozptylového toku je rozšíření feritů vhodné. To je způsobené tím, že rozptylový tok vytvořený primární cívkou je přitahován k těmto feritům namísto úniku do okolí. [12]

Rovněž bylo navrženo vrstvení postranních závitů, aby se zajistilo co nejužší cívky, a zároveň snížení rozptylového toku vznikajícího na těchto stranách. Nicméně rozteč pólů, což je vzdálenost mezi středy každé cívky, musí zůstat stejná, aby se dráha toku, která spojuje primární a sekundární cívky, nezkrátila. Toho je dosaženo právě vrstvením závitů. Takto vrstvená cívka může být "zapuštěna" ve feritech, což způsobuje, že vzniklý rozptylový tok bude mít jednodušší přístup do feritu. Tím se rozptylový tok sníží. [12]

Simulace ukazují, že kostní feritové jádro mírně snižuje přenesený výkon při zarovnaných vazebných cívkách. Nicméně při vychýlení o 200 mm je přenesený výkon stejný jako u systému bez přidávaných feritů. Přidané ferity velmi snižují hustotu rozptylového magnetického toku. Hustota toku v měřeném bodě (800 mm od středu) klesla skoro o 50 % při vychýlení o 200 mm. Na obrázcích 11 vidíme hustotu rozptylového pole při vychýlení jak

s původním jádrem, tak s jádrem ve tvaru kosti. Jak můžeme vidět, oblast největší hustoty je velmi zmenšena. V této simulaci je nastavená frekvence 20kHz, ačkoli trendem pro EV je 85 kHz. Podle zmíněné rovnice (11), při zvýšení frekvence nám hustota ještě klesne. [12]



Obr. 11 Hustota rozptylového toku, převzato z [12]

Při návrhu tohoto jádra je třeba být opatrný, protože zvýšení objemu feritu nemusí výrazně snížit rozptylový tok nebo by to nemělo význam s ohledem na zvýšené náklady a zvýšení hmotnosti. Například u IPT systému s nízkým výkonem je zbytečné takové ferity přidávat neboť vytvořený rozptylový tok je v toleranci předpisů ICNIRP. V důsledku tohoto nového jádra, vazebné prvky obsahují přibližně 1,5x více feritů. [12]

2.8 Odebrání feritů

Přestože ferity mají vynikající magnetické vlastnosti díky své vysoké relativní permeabilitě, jsou křehké a mohou saturovat při vysokých hustotách magnetického toku, což je nežádoucí při používání ve vozovkách. Dřívější práce ukázaly, že topologie zcela bez feritů jsou možné, pokud umístíme přídatnou cívku pod hlavní cívku. Na to byla navržena 2 alternativní řešení, u kterých se nepoužívají žádné ferity nebo jen v malém množství. Tyto topologie se nazývají bezferitové DD a DD s redukovanými ferity. [9]

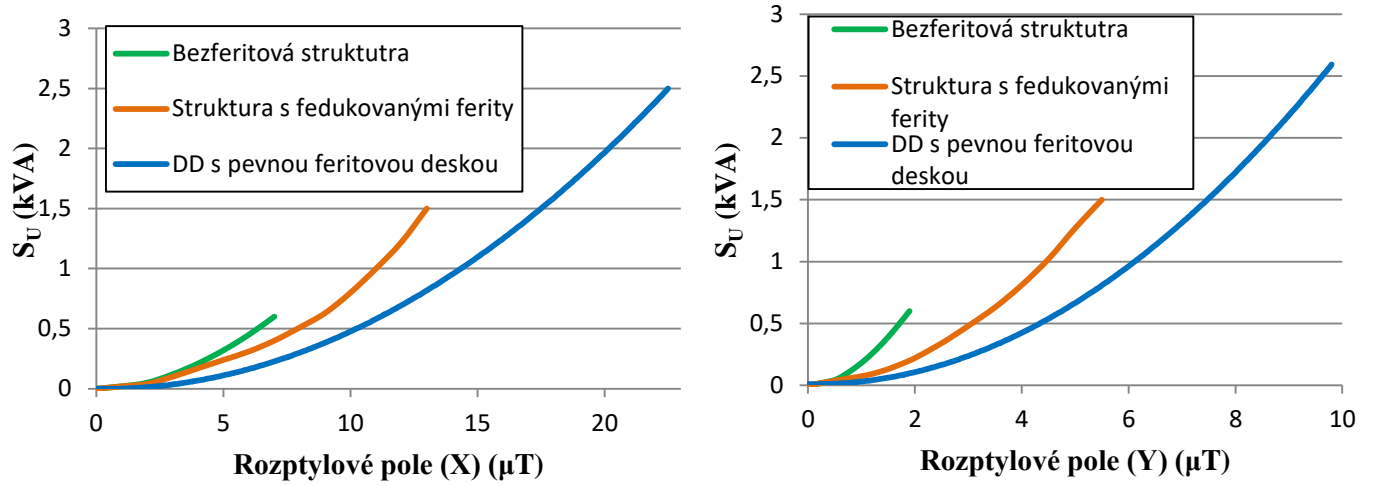
Bezferitová topologie obsahuje hlavní cívku a přídatnou cívku vzdálenou 100 mm, která formuje rozptylový tok unikající ze stran a zespod vazebných prvků. Proud touto přídatnou cívku je stejný jako hlavní cívku, ale teče opačným směrem. Nepoužitím feritu dosáhneme robustnějšího vazebného prvku, jelikož je použita pouze měď. [9]

DD s redukovanými ferity kombinuje strukturu DD s feritovou deskou s bezferitovou strukturou. To vede ke snížení množství feritů zhruba na 17 % a menšího počtu závitů přídavné cívky. Cílem toho je snížit množství feritů a zajistit dostatečný činitel vazby oproti bezferitové struktuře. Použité ferity se nacházejí v samém středu jako flux pipe a použitá přídavná cívka slouží k tvarování rozptylového toku pouze na stranách vazebných prvků. Tato cívka díky flux pipe efektu už pak nepotřebuje mít tolik závitů jako u předchozí struktury. Částečně je tato struktura podobná topologii s feritovými tyčemi, kde také dochází ke snížení množství feritů, čímž dochází k ušetření nákladu a zvýšení robustnosti. [9]

K simulaci byly použity tyto tři zmíněné systémy, přičemž rozměry hlavních cívek byly u všech tří systémů stejné. Přídavné cívky měly 6 respektive 3 závity. Rozptylový tok je pak měřen ve vzdálenosti 800 mm od středu v obou směrech X a Y. [9]

Při odebrání feritů klesá indukčnost cívek. Stejně tak klesá i činitel vazby kvůli redukci magnetického materiálu a vlivu přídavné cívky. Z rovnice (5), která říká, že $S_U \sim k^2 L_I$ můžeme vyvodit, že výsledný výkon bude nižší. Simulace a měření ukázaly, že tento výkon je zhruba 4x menší než u topologie s feritovou deskou při stejném proudu. Jelikož cívky mají nižší vlastní indukčnost a vazbu, je potřeba přibližně dvojnásobný primární proud pro dosažení stejného výkonu S_U . Pro přenos S_U 1 kVA u struktury s feritovou deskou je potřeba cca 38 A, přičemž Joulovy ztráty jsou cca 91W. U bezferitové struktury je proud 2x takový a ztráty jsou přibližně 350W. Pro redukovanou strukturu je třeba 50 A s hodnotou ztrát 155 W. [9]

Z obrázku 12 lze vidět, že poměr S_U a rozptylového pole je nejlepší pro bezferitovou strukturu. Při hodnotě rozptylového pole 27 μT jsme schopni přenést 7 kVA na rozdíl od 3 kVA u DD s feritovou deskou. Na druhou stranu, proud potřebný pro tento výkon by musel být přibližně 135 A na rozdíl od DD s feritovou deskou kde by nebylo potřeba ani 60 A. [9]



Obr. 12 Poměr výkonu a rozptylového toku [9]

3 Návrh vlastního uspořádání

Ve snaze navrhnout systém co dokáže přenést co největší výkon s minimálním rozptylovým polem, je navržen systém vycházející z výsledků, dosažených v předchozí kapitole. Zároveň je snaha o co nejnižší náklady a nejvyšší robustnost.

3.1 Návrh rozměrů vazebných prvků

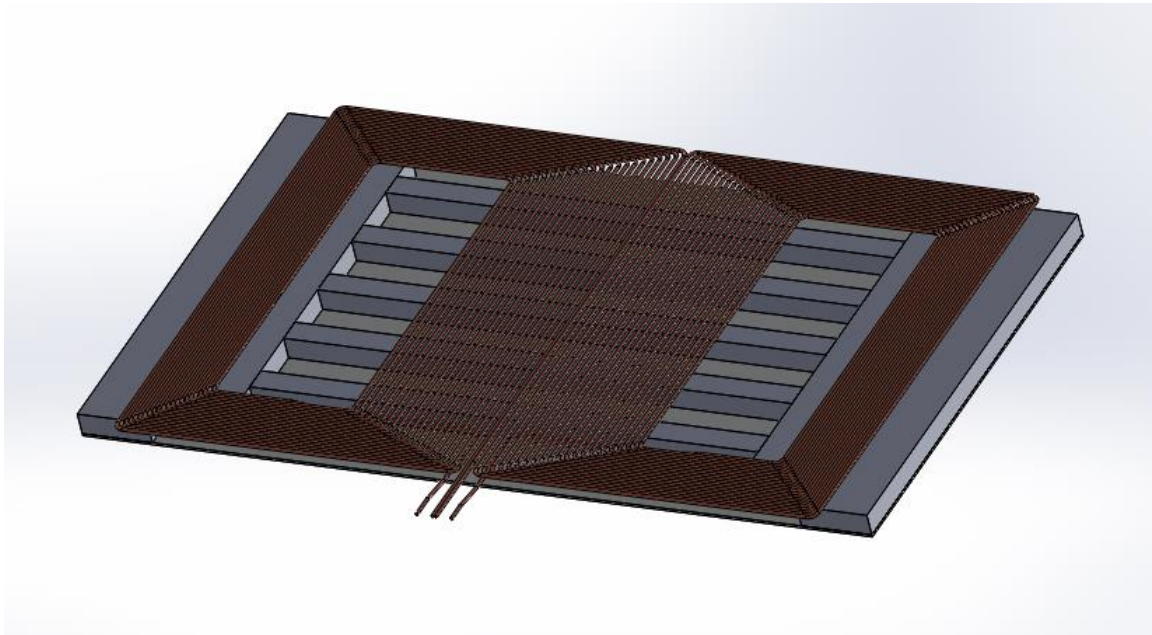
Model byl navržen podle poznatků získaných v přechozí kapitole. Model se skládá ze dvou párů planárních cívek o 22 závitěch vinutých měděným lankovým vodičem o průměru 4 mm. S ohledy na šířku automobilu (cca 1,5 m) je délka vazebných prvků zvolena 900 mm. Z poznatků z kapitoly 2.5, je šířka zvolena tak, aby byl poměr stran 3:2, tedy 600 mm. V obou případech se nacházíme v části křivky, kde činitel vazby má největší míru růstu. Krajiní části cívek jsou navinuty tak, aby mezi nimi nebyla žádná mezera, takže šířka je 88 mm. Prostor mezi těmito vnitřními kraji, je vyplněn závitě tak, aby flux pipe pokrýval ferity z 50 %. Mezera mezi závitě tedy činí přibližně 4 mm.

Pro návrh jádra byly vybrány ferity od společnosti JD&VD s.r.o. Byl vybrán materiál N87 o rozměrech 193x30x28 mm. Relativní permeabilita μ_r těchto feritů je 1930. Pro část jádra vedoucí hlavní tok φ_{ip} byl vybrán poměr rozestupu mezi ferity a šířkou feritů r_s roven 2. Tuto část jádra tedy tvoří 5 paralelních tyčí. Každá tyč je pak tvořená ze 7 feritových bloků. Na čela těchto tyčí jsou umístěny kolmo další tyče tak, aby tvořily kostní feritové jádro, které má za úkol snížit rozptylové pole. První tři tyče jsou sestaveny z 5 bloků a druhé tři tyče ze 6 bloků.

Pod ferity byla navíc přidána hliníková deska o rozměrech 1000 mm x 600 mm a tloušťce 5 mm jako stínění. Tato deska je vzdálená od feritů 5 mm.

3.2 Fyzikální model

Model byl vymodelován v 3D programu Solidworks a následně nahrán do programu ANSYS. Pro zjednodušení simulace byly cívky v programu ANSYS namodelovány jako masivní vodič a následně bylo v programu nastaveno, že se jedná o cívku s 22 závitě.



Obr. 13 Navržený model

3.3 Výpočetní model

Pro cívky byla nastavena měď s vodivostí 58 000 000 S/m a relativní permeabilitou μ_r 0,999 991. Hliníkové stínění bylo nastaveno s vodivostí 38 000 000 S/m a relativní permeabilitou 1,000 021. Pro okolí modelu je nastaven vzduch. Hranice výpočetního modelu jsou 2x větší ve všech směrech X, Y, Z než rozměry vazebných prvků. Abychom mohli pozorovat hustotu rozptylového pole, bylo na rovinách X a Y nastaveno zobrazování nasimulovaných výsledků.

Při analýze eddy current jsme si nechali vypočítat odpor cívek a vlastní a vzájemné indukčnosti cívek. Tyto hodnoty pak byly použity pro náhradní obvod v modulu simplorer, který můžeme vidět na obrázku 14. Odpor cívek vyšel 0,034 Ω , vlastní indukčnost 530 μH a vzájemná indukčnost 90 μH . Hodnota napětí zdroje byla nastavena na 230V. Jelikož jsme pro zjednodušení v náhradním obvodu nahradili primární cívky jednou cívkou, bylo potřeba z vlastní a vzájemné indukčnosti vypočítat celkovou indukčnost pro paralelně zapojené cívky při působení magnetického toku ve stejném směru. Výpočet byl proveden podle rovnice:

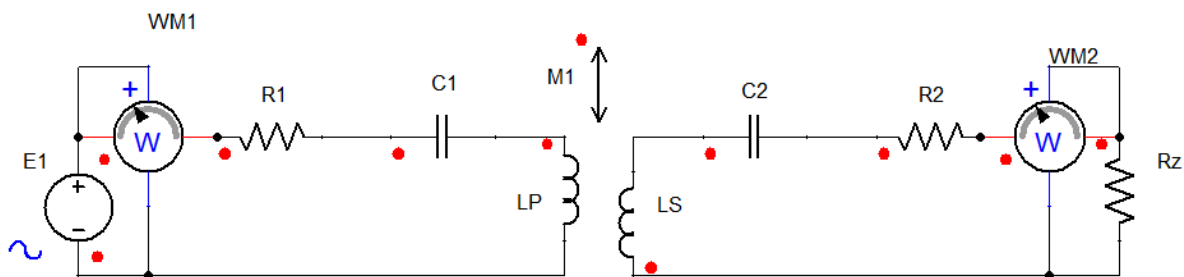
$$\frac{1}{L_1} = \frac{1}{L_{11}+M} + \frac{1}{L_{12}+M} \quad (12)$$

Jelikož všechny cívky mají stejné geometrické parametry, mají i relativně stejně velkou vlastní indukčnost a můžeme napsat, že $L_{11} = L_{12} = L_c$. Potom tedy můžeme rovnici upravit na tvar:

$$L_1 = \frac{L_c + M}{2} = \frac{530 \cdot 10^{-6} + 90 \cdot 10^{-6}}{2} = 310 \mu H \quad (13)$$

Z Tomsonova vztahu jsme pak odvodili rovnici pro výpočet hodnoty kapacity pro frekvenci 85 kHz.

$$C = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_1} = \frac{1}{(2\pi \cdot 85000)^2 \cdot 310 \cdot 10^{-6}} = 11,309 nF \quad (14)$$



Obr. 14 Schéma simulace

Jako základní byla určena pozice, kdy jsou vazebné prvky zarovnané a vzdálenost mezi nimi je 200 mm. V této pozici jsme si nechali analýzou eddy current spočítat hodnotu činitele vazby, která byla rovna 0,352. Hodnota průměrného výstupního výkonu v této optimální pozici byla zvolena 22 kW. Abychom tohoto výkonu dosáhli při zvoleném napájecím napětí, byla velikost zátěže nastavena na 1825 Ω . Při tomto nastavení bylo zkoumáno, jakých výkonů a účinností systém dosahuje při vyosení ve směrech X a Y. Vyosení bylo prováděno po 50 mm do vzdálenosti 300 mm. Toto vyosení bylo zkoumáno pro vzdálenosti ve směru Z 150, 200 a 250 mm. Vyosení ve směrech X a Y bylo provedeno jen v prvním kvadrantu, jelikož v ostatních vycházejí výsledky zrcadlově.

3.4 Výsledky měření

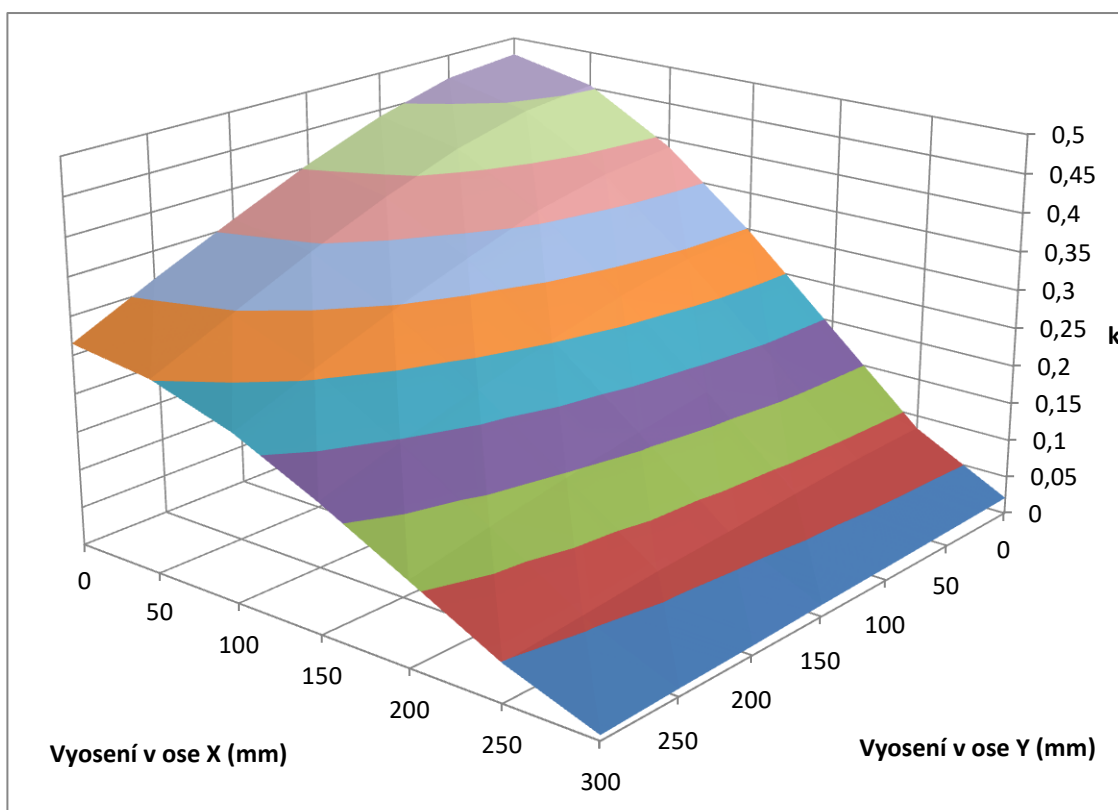
V následující tabulce můžeme vidět některé hodnoty, které byly vypočítány. Hodnoty činitele vazby byly vypočítávány pro každou hodnotu vyosení zvlášť v analýze eddy current. V simploreru pak byly tyto hodnoty měněny jako jediné. Výsledkem dalších simulací byl

vstupní a výstupní výkon, z kterého pak byla vypočítána účinnost systému. Zeleně označené hodnoty jsou pro základní pozici.

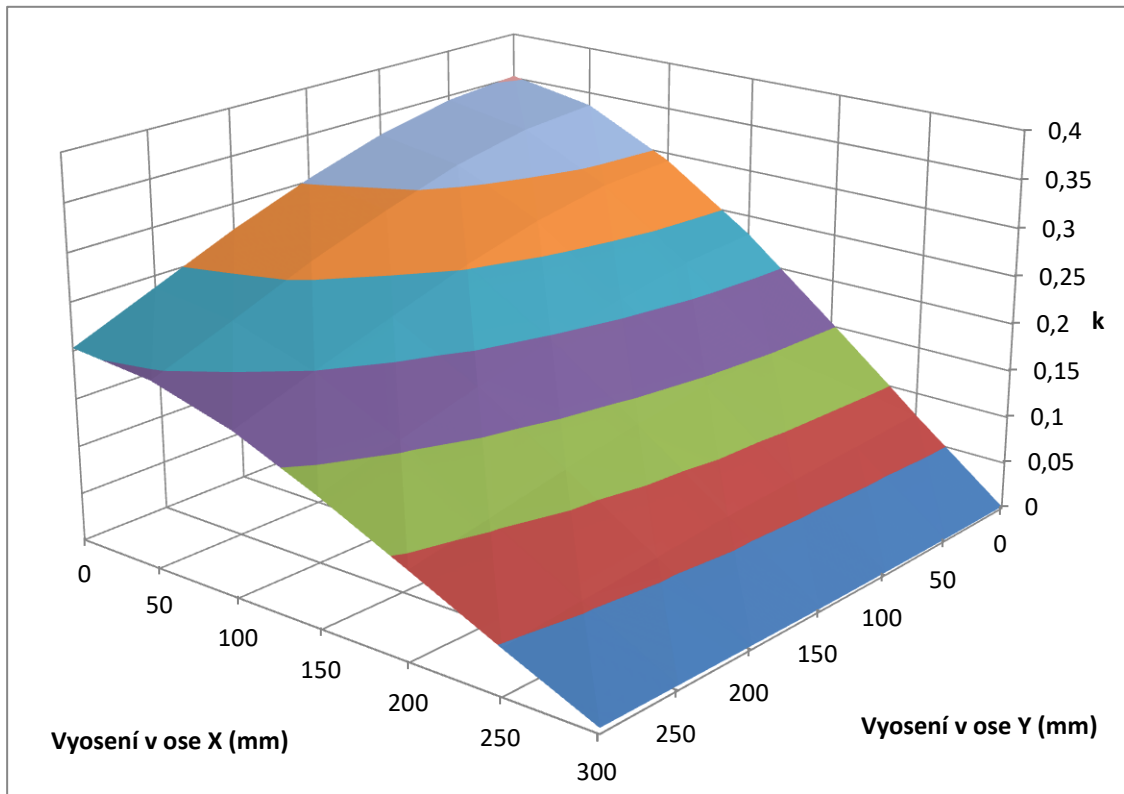
Tab. 1 Parametry při vyosení
vzdálenost 200 mm

x; y	-300; -300		-150; -300		0; -300	
k	0,006		0,134		0,203	
$P_{in, out}$ (kW)	101,9	0,1	73,7	34	52,5	37,2
η	0,1 %		46,1 %		70,9 %	
x; y	-300; -150		-150; -150		0; -150	
k	0,003		0,197		0,303	
$P_{in, out}$ (kW)	101,9	0,03	54,1	37,5	30,9	27
η	0,0 %		69,3 %		87,4 %	
x; y	-300; 0		-150; 0		0; 0	
k	0,002		0,23		0,352	
$P_{in, out}$ (kW)	101,9	0,02	45,4	35	24,3	22,03
η	0,0 %		77,1 %		90,7 %	

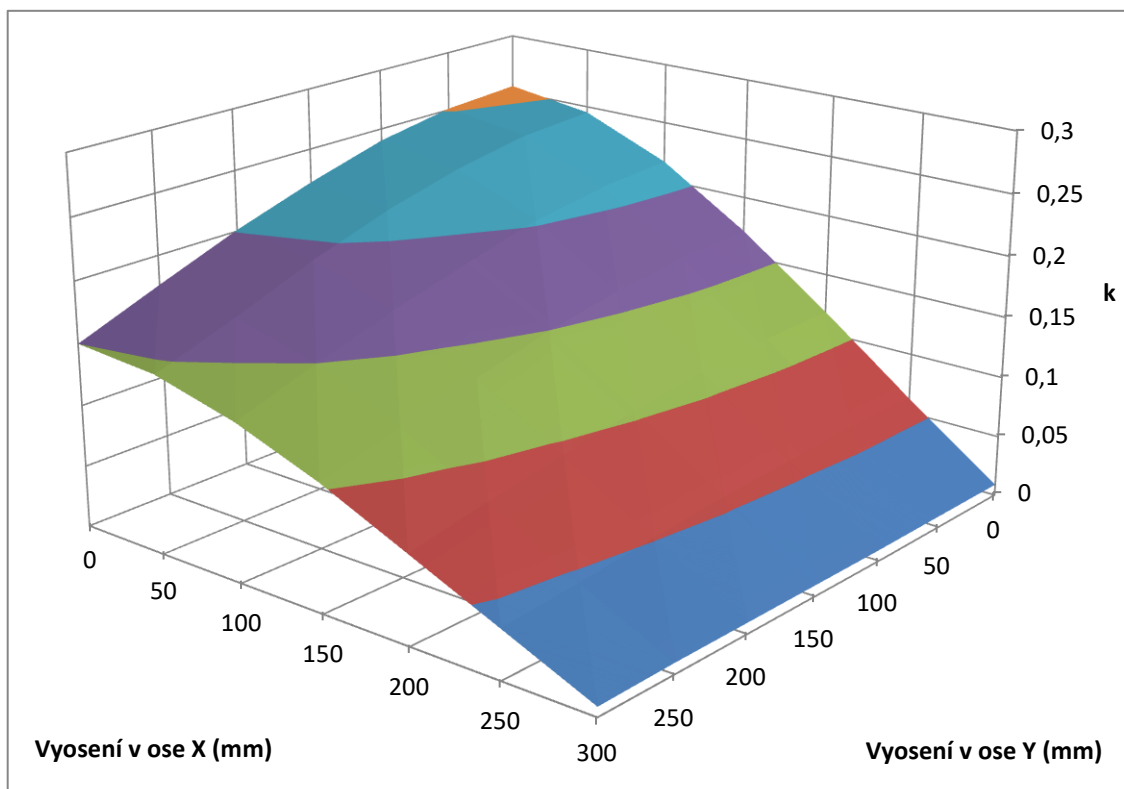
Podle předpokladů můžeme z tabulky a grafů vidět že činitel vazby klesá ve směru X mnohem rychleji než ve směru Y.



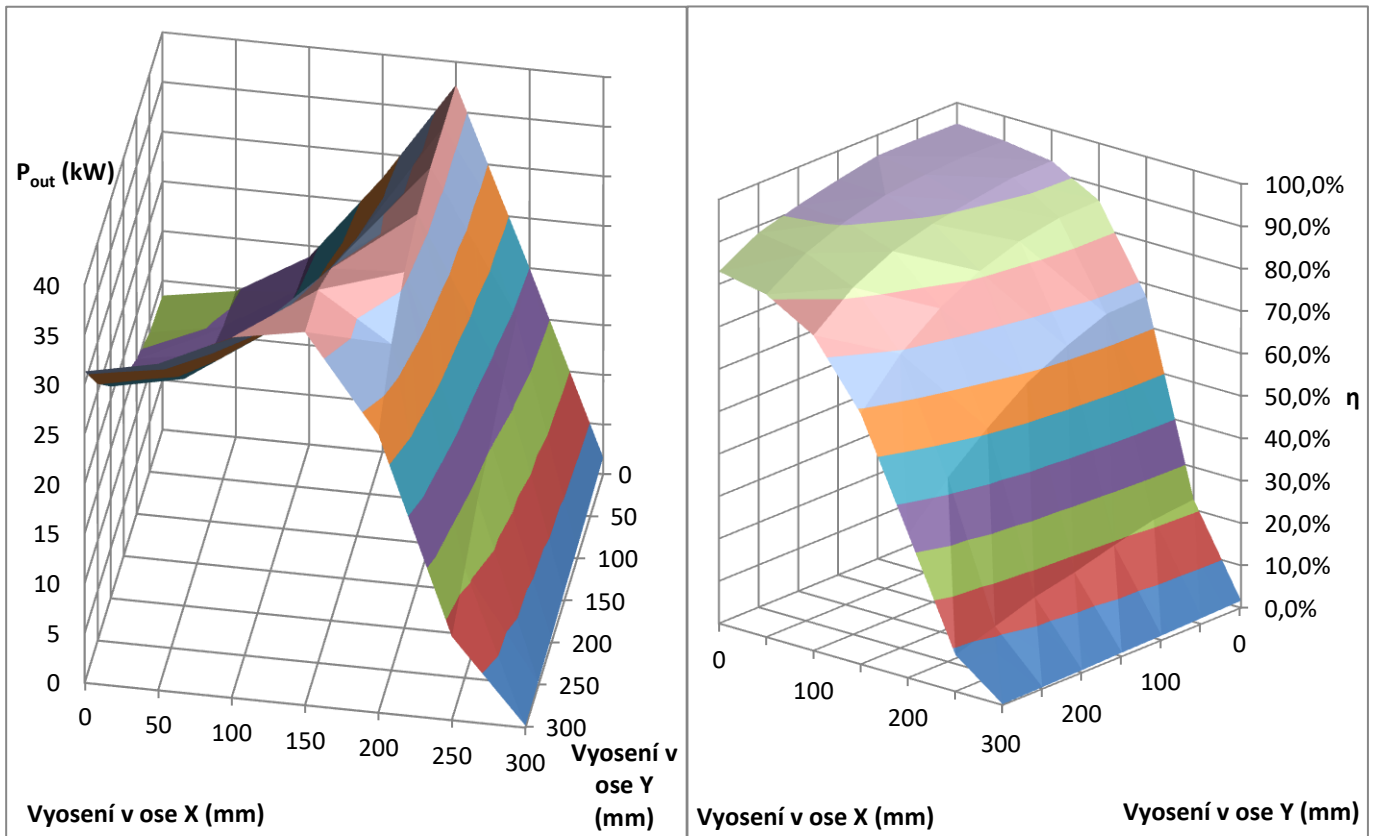
Obr. 15 Závislost činitele vazby na vyosení ve vzdálenosti 150 mm



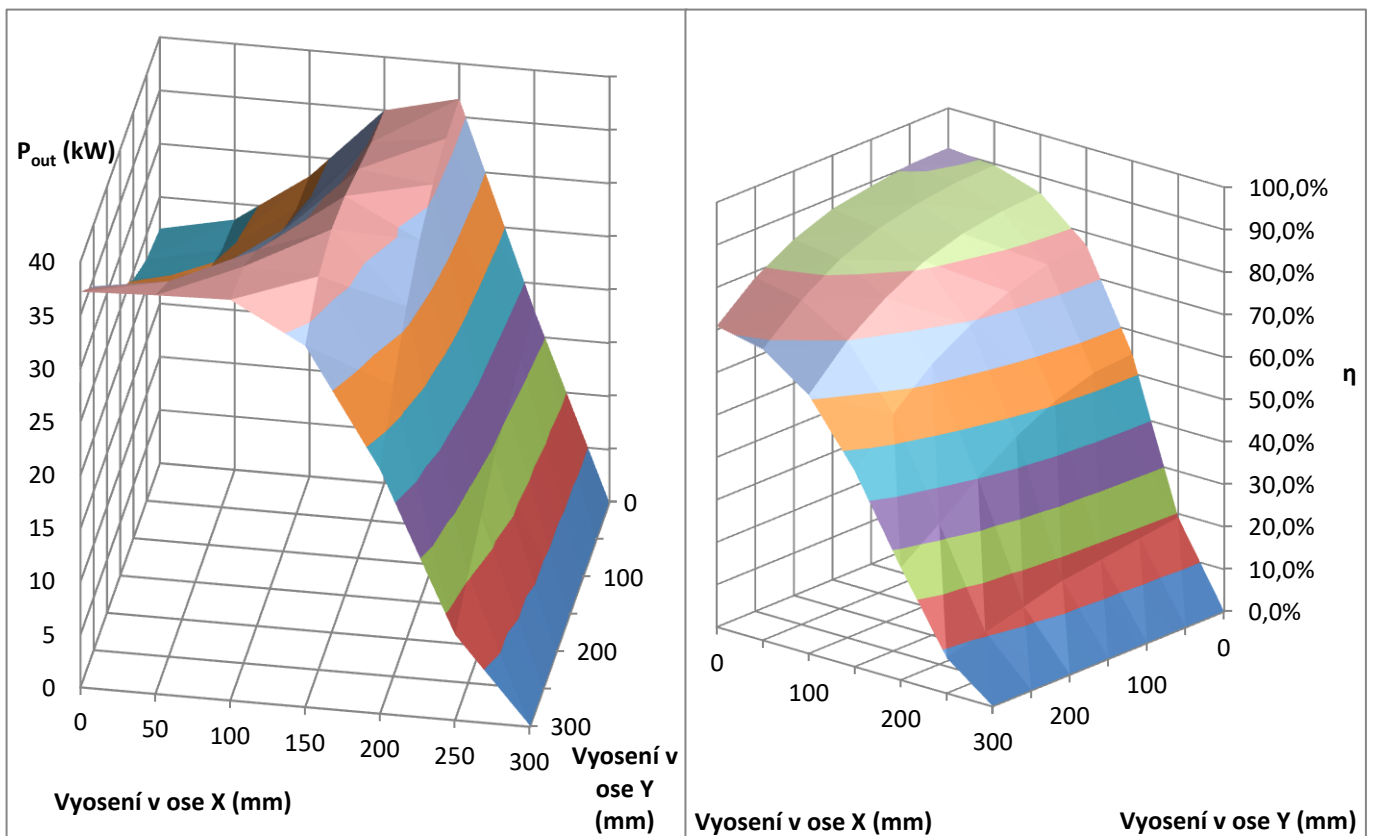
Obr. 16 Závislost činitele vazby na vyosení ve vzdálenosti 200 mm



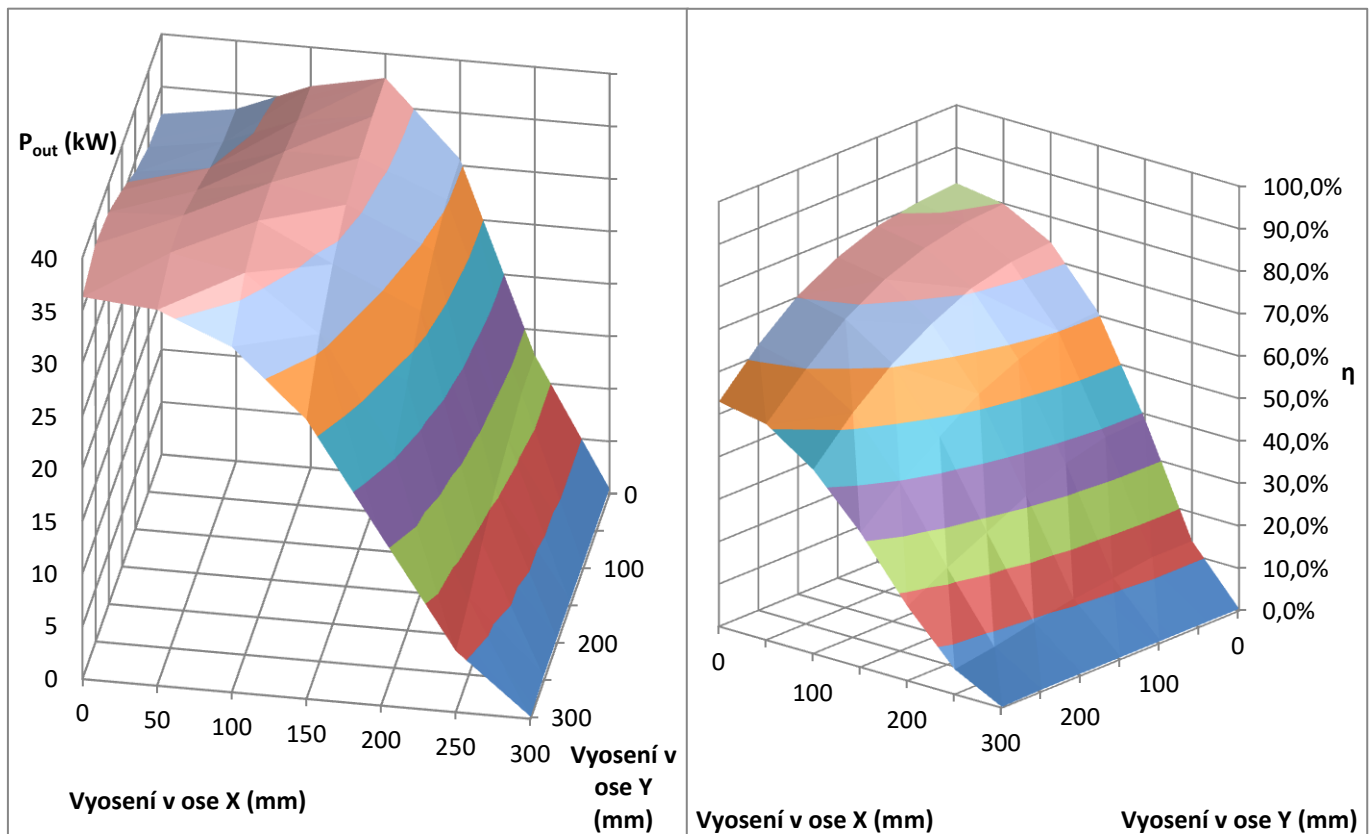
Obr. 17 Závislost činitele vazby na vyosení ve vzdálenosti 250 mm



Obr. 18a Závislost výstupního výkonu na vyosení ve vzdálenosti 150 mm
 b Závislost účinnosti na vyosení ve vzdálenosti 150 mm



Obr. 19a Závislost výstupního výkonu na vyosení ve vzdálenosti 200 mm
 b Závislost účinnosti na vyosení ve vzdálenosti 200 mm

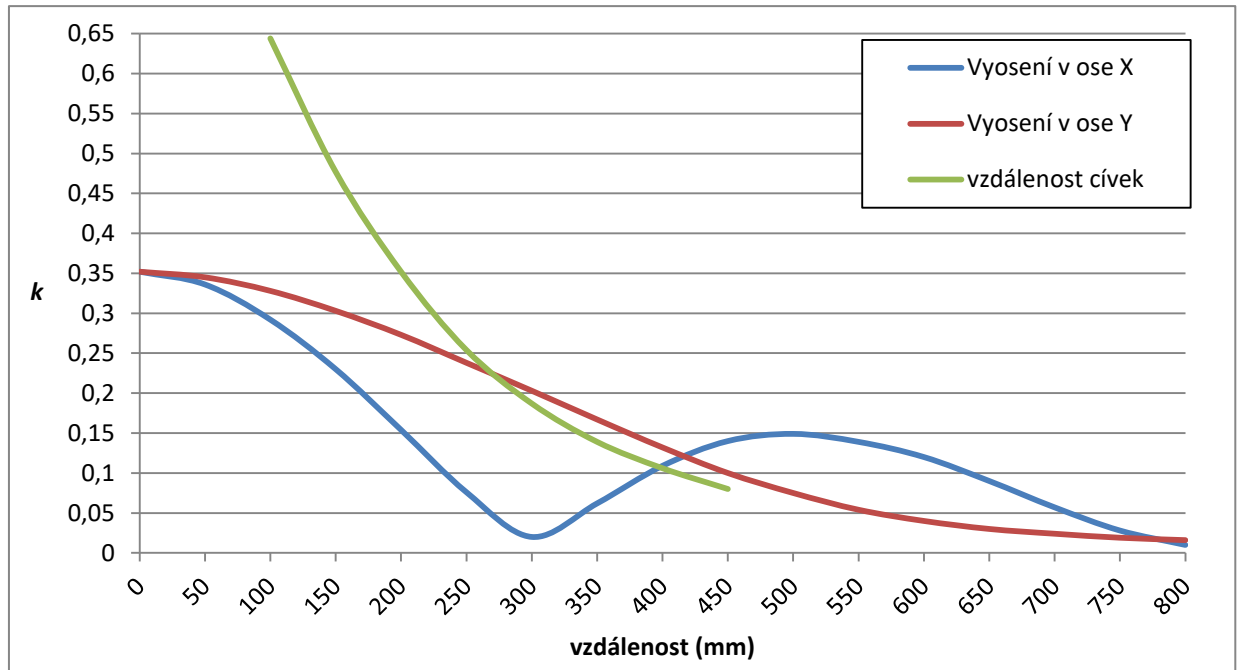


Obr. 20a Závislost výstupního výkonu na vyosení ve vzdálenosti 250 mm
 b Závislost účinnosti na vyosení ve vzdálenosti 250 mm

Z grafů výše můžeme pozorovat, že výstupní výkon P_{out} i přes klesající činitel vazby k z počátku roste. To je způsoben tím, že při těchto nastavených parametrech stoupá i výkon primárního zdroje. Ten roste v závislosti na klesání vzájemné indukčnosti a tím růstu primárního proudu. Tento výkon ovšem stoupá mnohem výrazněji než výstupní výkon a tím klesá účinnost celého systému. Podle vzorce (9) výstupní výkon roste do té doby, dokud rostoucí primární proud I_1 kompenzuje snižující se kvadrát činitele vazby k . Jak můžeme vidět, při nejvyšším výkonu přibližně 37 kW, se při vyosení o 150 mm v ose X účinnost pohybuje kolem 60 %. Pokud porovnáme oblast nejvyššího výkonu s činitelem vazby, můžeme si všimnout, že nejvyššího výkonu dosahujeme tehdy, pohybuje-li se činitel vazby mezi hodnotami 0,15 – 0,20. V této chvíli můžeme říct, že růst primárního proudu není dostatečný pro kompenzaci snižujícího se kvadrátu činitele vazby a výstupní výkon bude klesat.

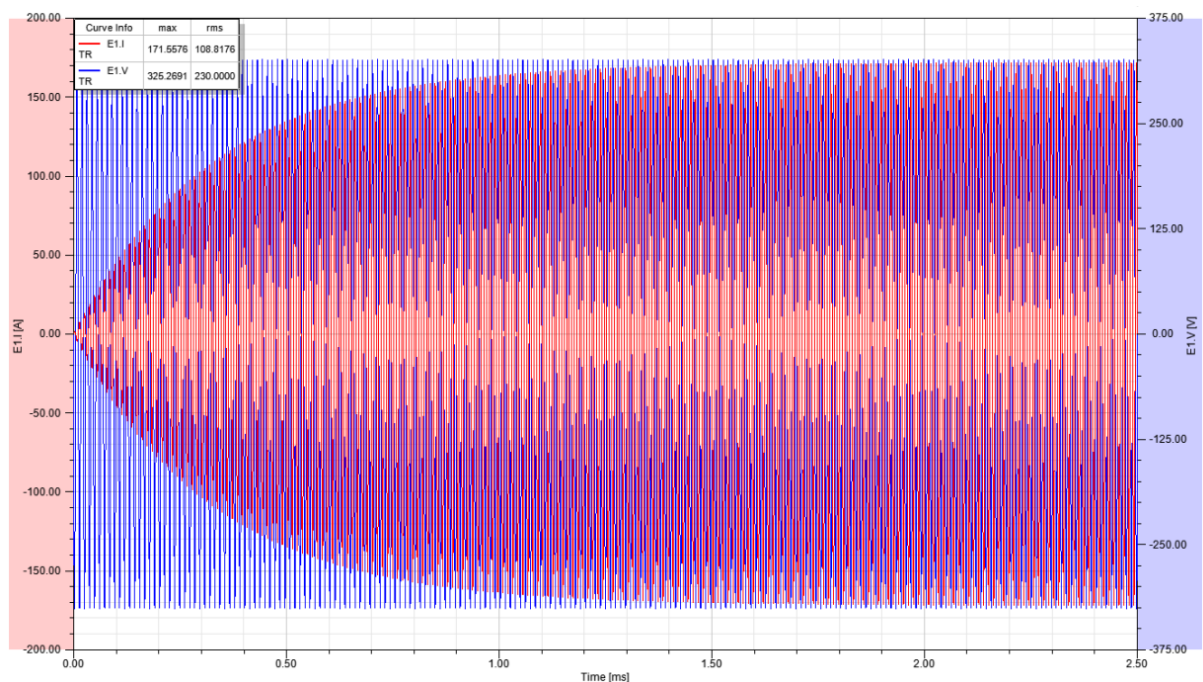
Klesání hodnoty činitele vazby, odpovídá údajům uvedených v kapitole 2.1. Hodnoty k se při vyosení v ose X dostávají k nulové hodnotě, vyosíme-li vazebné cívky v tomto směru přibližně o 33 % celkové délky vazebných prvků. V ose Y hodnota k klesá do hodnoty vyosení 500 mm téměř lineárně. Pokud vazebné prvky budeme oddalovat, hodnota činitele

vazby k exponenciálně klesá. Tato hodnota byla měřena pouze do vzdálenosti 450 mm, jelikož se nepředpokládá, že by některá vozidla měla podvozek takto vysoko.

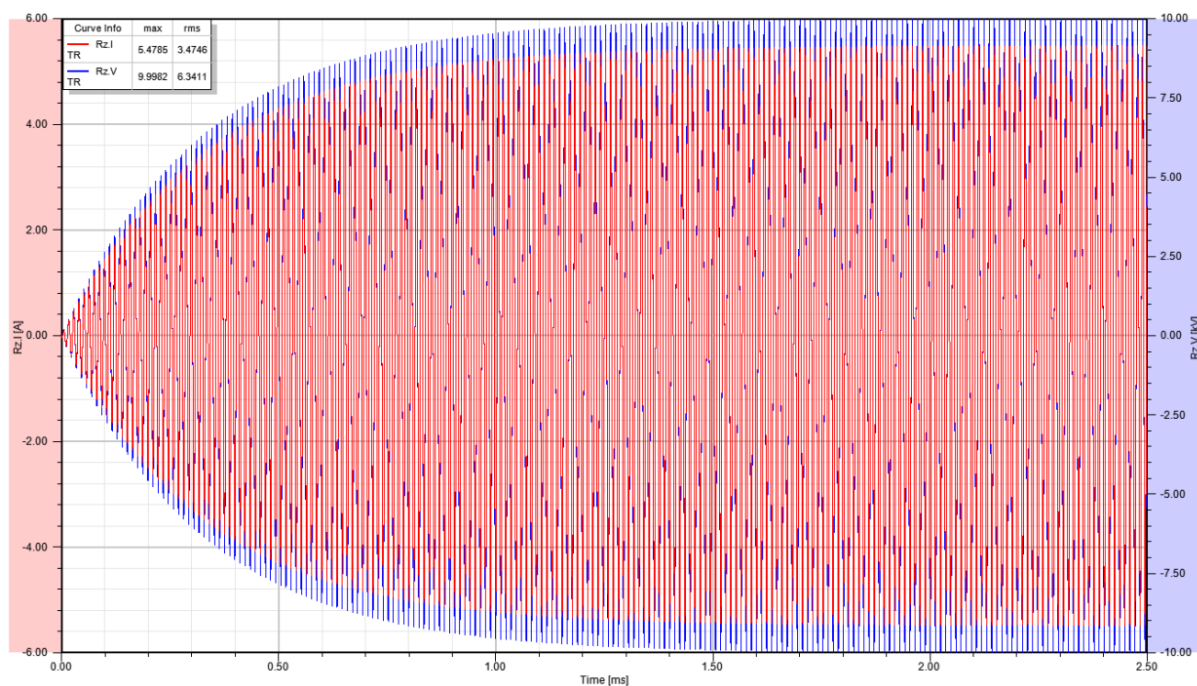


Obr. 21 Závislost činitele vazby na změnu vzdáleností

Na obrázcích 22 a 23 můžeme pozorovat průběhy proudů a napětí na primárním a sekundárním vazebném prvku, jsou-li umístěny v základní pozici. Při zadaném napájecím napětí 230 V efektivních, je efektivní hodnota primárního proudu 121 A. Na sekundární cívce se indukuje napětí 6,3 kV, které určuje sekundární proud I_2 roven 3,5 A.



Obr. 22 Průběh primárního napětí a proudu

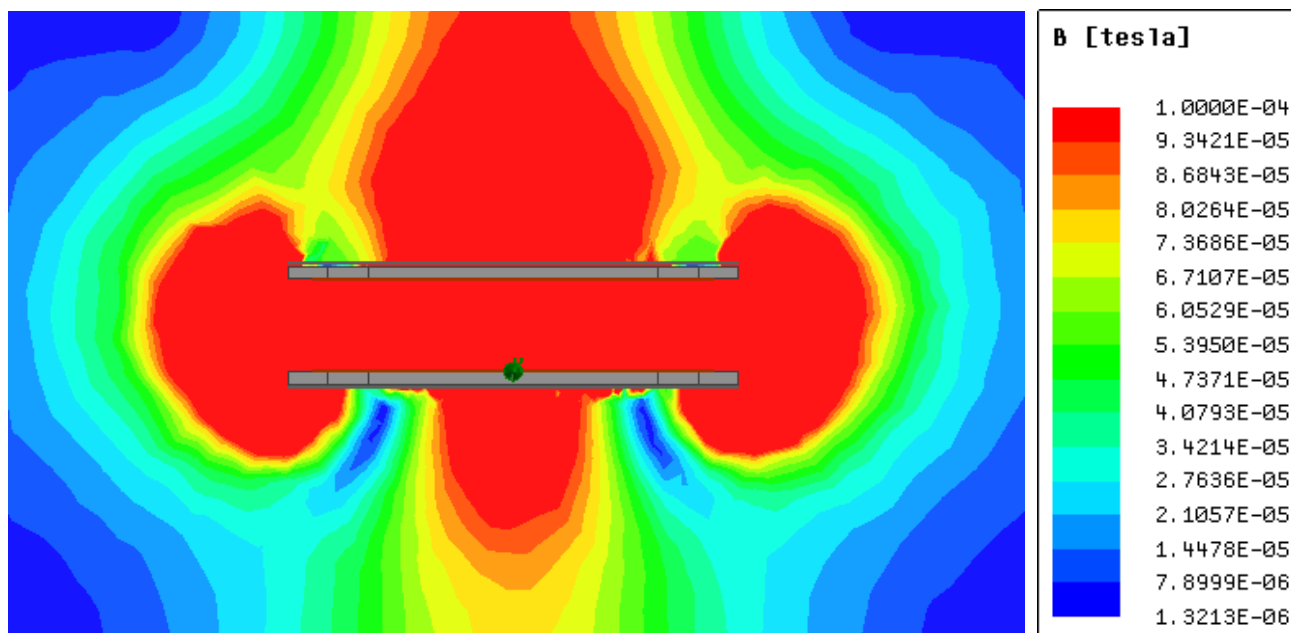


Obr. 23 Průběh sekundárního napětí a proudu

Při podrobnějším prozkoumání lze vidět, že napětí a proud na zátěži jsou ve fázi a účinník je tedy roven 1.

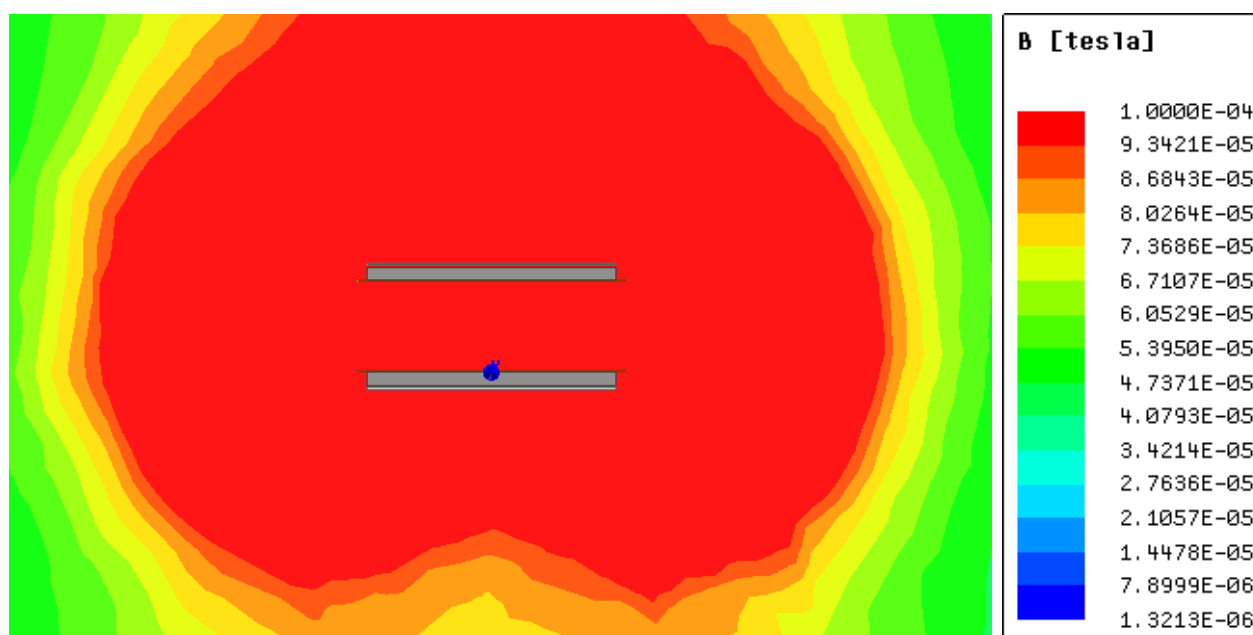
3.5 Výsledky rozptylového toku

Pro použití bezdrátového přenosu energie v praxi je potřeba dodržet bezpečnostní předpisy pro rozptylový magnetický tok. Limitující hodnota rozptylového toku je pro veřejné prostory 27 μT efektivní hodnoty. Maximální hodnoty tedy odpovídají 38 μT .



Obr. 24 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků (pohled zepředu)

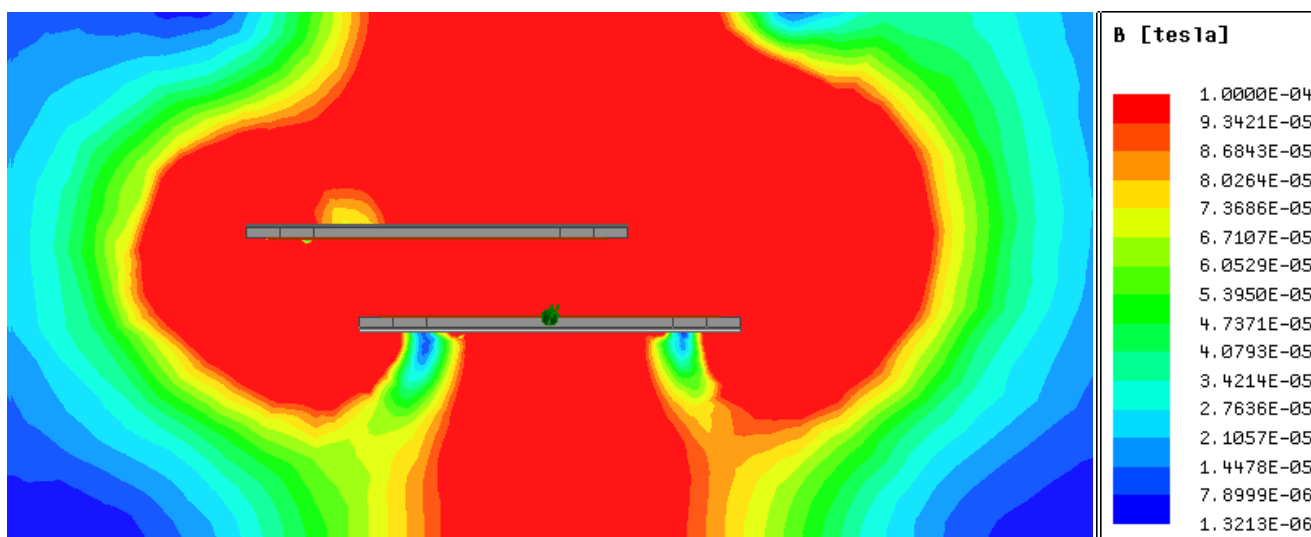
Při pohledu zepředu můžeme vidět, že tato limitující hodnota rozptylového toku leží mimo vazebné prvky. Pokud se zaměříme na rozptylový tok unikající do stran, můžeme říct, že budou-li vazebné prvky umístěny ve středu podvozku vozidla, tento tok se nedostane mezi procházející osoby, jelikož hranice $38 \mu\text{T}$ se nachází přibližně ve vzdálenosti 850 mm od středu cívek. Dospod unikající rozptylový tok je větší ale zde nemá tento tok čemu uškodit. Největší problém zde tvoří tok, unikající vzhůru. Pokud by se tento tok dále neredukoval, mohl by se dostat do prostoru vozidla a tam působit na cestující. Část tohoto toku by mohla odstínit konstrukce vozidla. Na obrázku 25 vidíme vazebné prvky při pohledu z boku (pohled na kratší stranu). Rozptylový tok ve směru Y je mnohem větší než ve směru X, který jsme viděli výše. Přítomnost feritů na krajích vazebných prvků (kostní feritové jádro) má dobrý vliv na snížení rozptylového toku. Odebrání těchto feritů významně zvýšilo rozptylový tok, unikající ve směru X. Na obrázku 25 je vidět, že absence těchto feritů na delší straně je velmi výrazná.



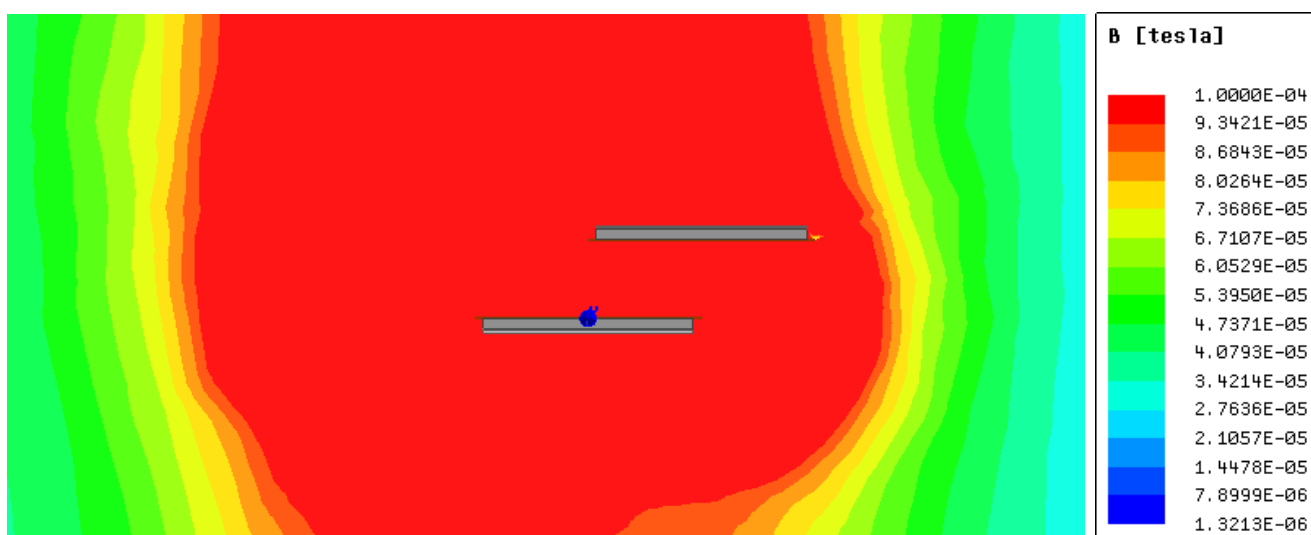
Obr. 25 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků (pohled z boku)

Při vyosení vazebných prvků o 300 mm v ose X je patrné zvýšení hustoty rozptylového toku nad stranou primární cívky, ze které byla sekundární cívka odsunuta. To je způsobeno sníženým činitelem vazby k . Hodnota rozptylového toku $38 \mu\text{T}$ unikajícího do stran se nachází ve vzdálenosti 1225 mm od středu cívek. Pokud budeme předpokládat, že primární cívky budou umístěné ve středu jízdního pruhu, můžeme říct, že hodnota $38 \mu\text{T}$ se nachází na kraji vozovky. Rozptylový tok unikající vzhůru je ovšem velmi vysoký a pro praktické využití bezdrátového přenosu energie je potřeba tento tok redukovat. Vyosení vazebných prvků v ose

Y o 300 mm můžeme vidět na obrázku 27. Podobně jako u zarovnaných vazebných prvků je hodnota rozptylového toku vysoká. Na rozdíl od vyosení o 300 mm v ose X, kdy k klesne k nule, je zde hodnota činitele vazby pořád dostačující ($k = 0,203$).



Obr. 26 Hustota rozptylového toku vyosených vazebných prvků v ose X (pohled zepředu)

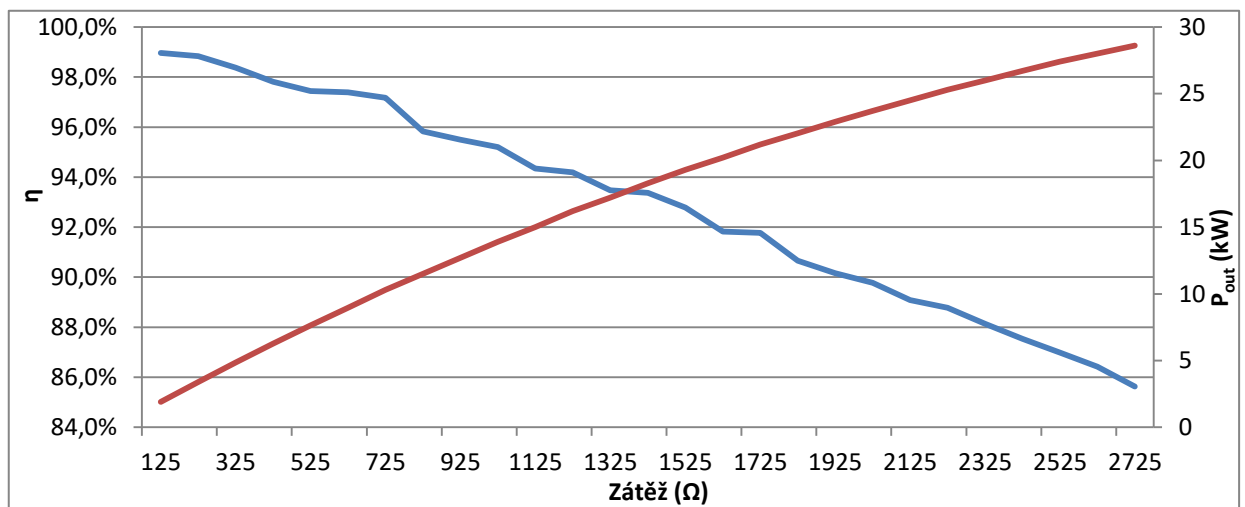


Obr. 27 Hustota rozptylového toku vyosených vazebných prvků v ose Y (pohled z boku)

3.6 Výsledky při změně zátěže

Můžeme předpokládat, že přes primární vazebné cívky budou projíždět různá vozidla různých výrobců. Proto je třeba uvažovat, že každé vozidlo bude vybaveno různými součástkami, motory, bateriemi atd. Z tohoto důvodu je třeba počítat s různou velikostí zátěže. Na obrázku 28 vidíme závislost výstupního výkonu a účinnosti na zátěži za předpokladu, že činitel vazby zůstává konstantní. Předpokládáme tedy, že vzdálenost mezi vazebnými prvky a celkový uzavřený tok zůstává stejný. Pokud se s primární vazebnou cívkou spáruje vozidlo s relativně nízkou hodnotou zátěže, přenesený výkon bude dosahovat

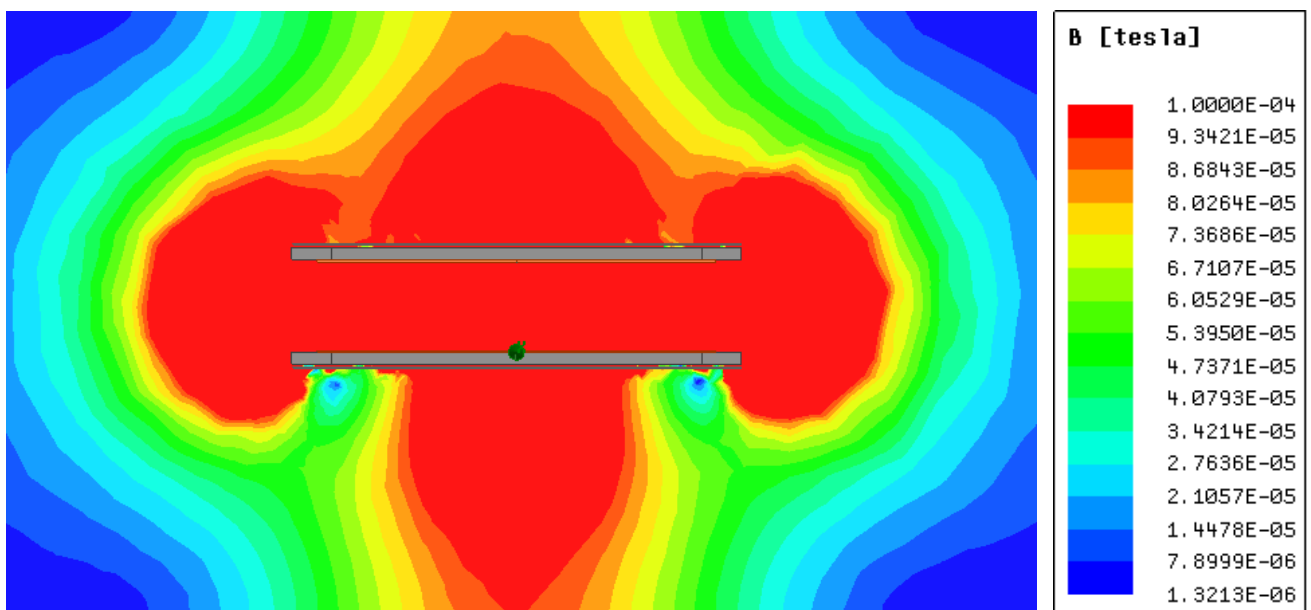
nižších hodnot, ale s vyšší účinností. Například při zátěži 325 Ω je sice přenesený výkon pouze 4,85 kW oproti 22 kW při zátěži 1825, ale účinnost dosahuje 98,4 % oproti 90,7 %. Naopak při zátěži 2725 Ω je přenesený výkon roven 28,6 kW ale s účinností 85,6 %.



Obr. 28 Závislost výstupního výkonu a účinnosti na zátěži

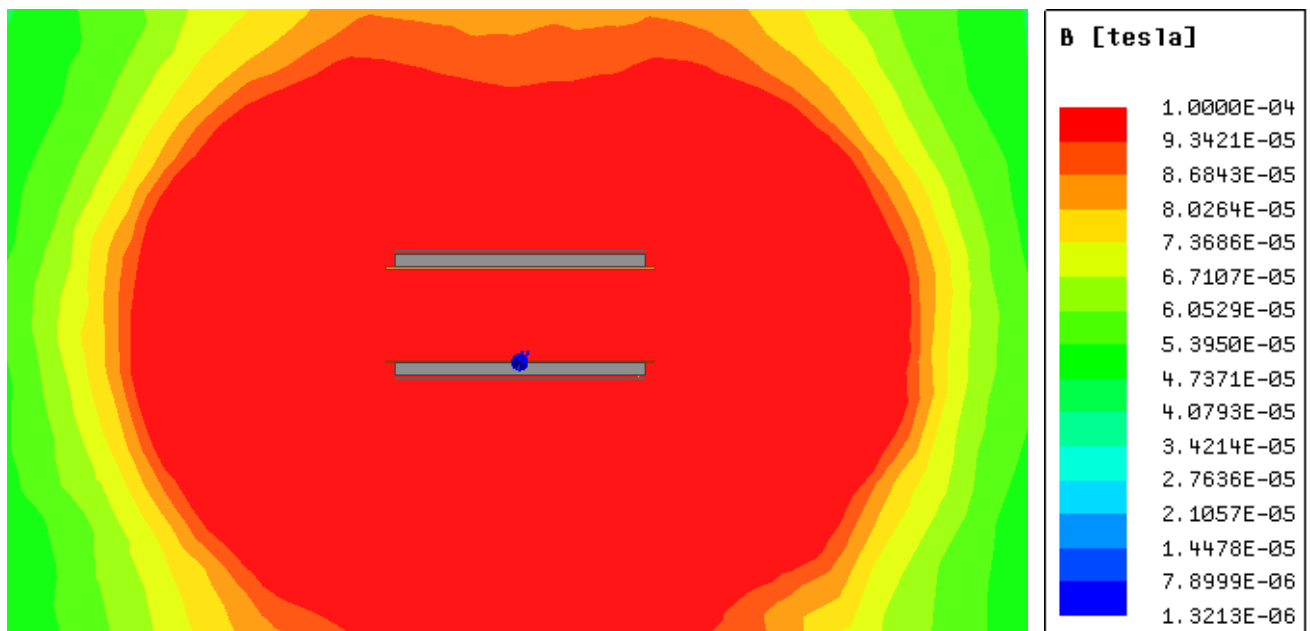
3.7 Optimalizace modelu

Jelikož rozptylové pole navrženého modelu nesplňovalo limity dané ICNIRP, je zde nastíněno několik možností změn, které se v modelu mohou udělat. Na obrázcích 24 a 25 jsme viděli, že rozptylový tok je nedostačující ve směru Z a ve směru Y byl také velký, nicméně mimo vozidlo by se v tomto směru také neměl dostat. Proto byly přidány další 2 feritové tyče na okraj vazebných prvků ve směru X ve snaze redukovat jak tok unikající vzhůru ve směru Z, tak tok unikající ve směru Y.



Obr. 29 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků s přidávanými ferity (pohled zepředu)

Na obrázku 29 můžeme pozorovat, že přidání feritů mělo pozitivní vliv na zmenšení rozptylového pole nad vazebnými prvky. Z tohoto pohledu je dobře patrná změna ve směru Z směrem nahoru. Směrem dolů se hodnota rozptylového pole nepatrně zvýšila. Zmenšení rozptylového pole je s největší pravděpodobností způsobeno vstoupením magnetického toku do přidávaných feritů, namísto úniku do okolí. Červená oblast nejvyšší hustoty je podstatně menší a dosahuje menší vzdálenosti. Z toho vyplývá, že i hranice $38 \mu\text{T}$ leží níž než u předchozího modelu. Rozptylový tok po stranách (v ose X) je srovnatelný s předchozím modelem. Na následujícím obrázku 30 je opět patrné, že rozptylový tok unikající vzhůru je menší. Bohužel na rozptylový tok ve směru Y, přidání feritů nemělo požadovaný efekt.

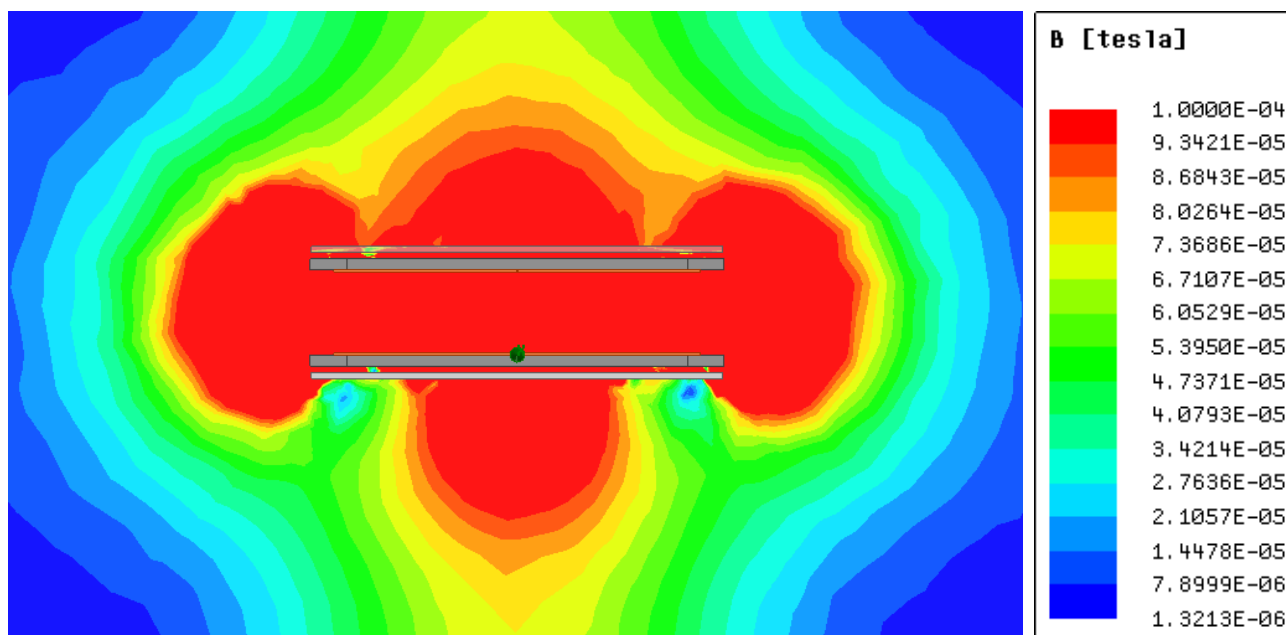


Obr. 30 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků s přidávanými ferity (pohled z boku)

S přidáním feritů se změnili i některé parametry. Hodnota činitele vazby v základní pozici stoupla na 0,36. Vlastní indukčnost jednotlivých cívek vzrostla na $570 \mu\text{H}$ a vzájemná na $160 \mu\text{H}$. Celková indukčnost tedy stoupla na $365 \mu\text{H}$, čemuž pro rezonanci odpovídá velikost kondenzátoru $9,605 \text{ nF}$. Pro zachování výstupního výkonu 22 kW byla hodnota zátěže nastavena na 2980Ω .

Jako druhý krok byly přidány další 2 feritové tyče vedoucí hlavní tok φ_{ip} tak, že rozstup mezi jednotlivými tyčemi byl 40 mm . Poměr r_s tedy činil 1,33. Výsledek simulace ukázal, že přidání feritových tyček mělo na rozptylový tok jen nepatrný účinek. Činitel vazby se také zvýšil jen nepatrně. Proto pro další optimalizace bylo od této možnosti upuštěno a pokračovalo se dál jen s 5 feritovými tyčemi.

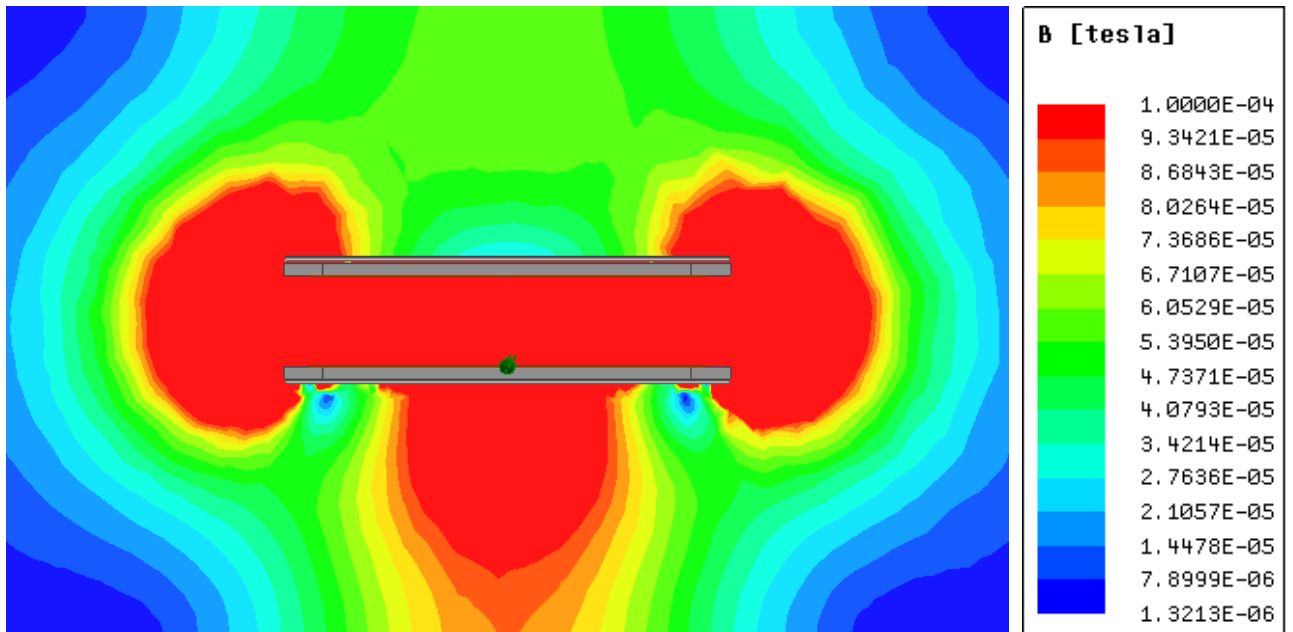
Jako třetí krok optimalizace byla zvětšena mezera mezi ferity a hliníkovým stíněním a tloušťka samotného stínění. Na následujícím obrázku tak vidíme rozptylové pole, kdy vzdálenost a tloušťka činily 15 mm. Zde jde vidět, že tento krok rozptylové pole částečně redukoval. Pro úplné odstínění pole nad vazebnými prvky pro tento výkon by ale byla potřeba mezera 70 mm a tloušťka hliníkové desky také 70 mm. Takovéto rozměry už ovšem nejsou v praxi použitelné. Proto je potřeba podniknout další kroky pro odstínění.



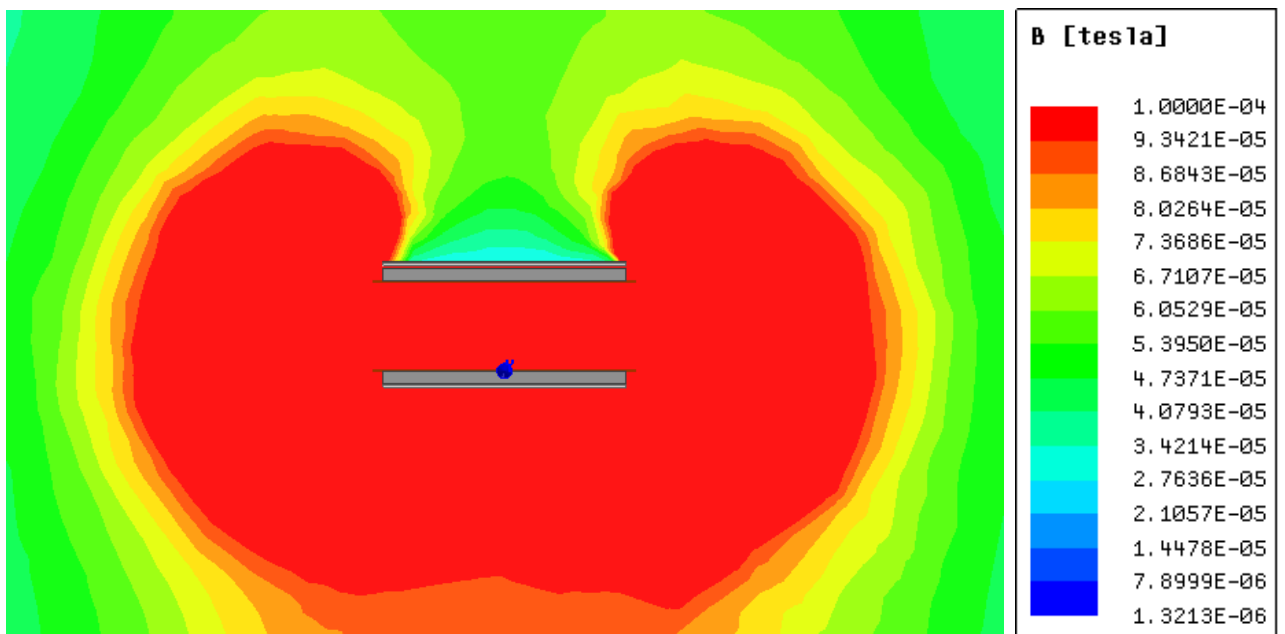
Obr. 31 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků s rozšířeným hliníkovým stíněním

Tímto dalším krokem bylo přidání feritové desky o tloušťce 5 mm nad hliníkové stínění, který můžeme vidět na následujícím obrázku 32. Tato deska je tvořena malými feritovými destičkami o rozměrech 164x50,8x5 mm. Materiál byl opět vybrán N87 s relativní permeabilitou μ_r 1450.

Jak jde vidět z obrázků 32 a 33 rozptylové pole unikající vzhůru je značně sníženo, nicméně hranice 38 μT se pořád nachází ve velké vzdálenosti. Tato vzdálená feritová deska nemá už žádný vliv na činitele vazby, který tedy zůstává 0,36.



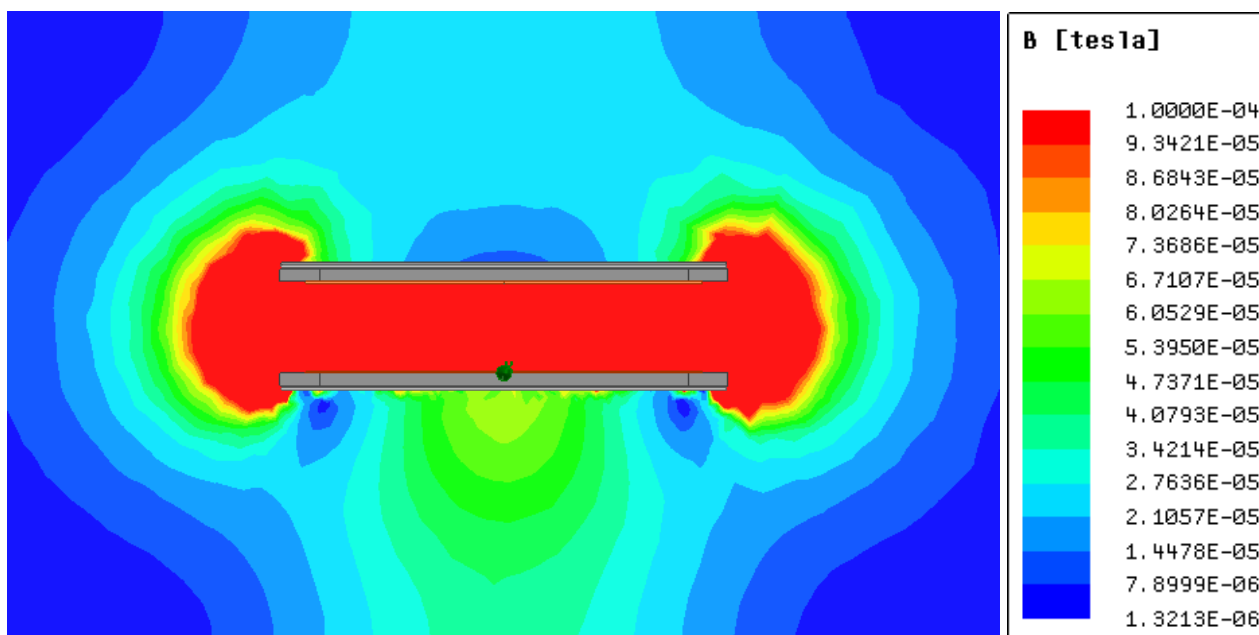
Obr. 32 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků s feritovou deskou
(pohled zepředu)



Obr. 33 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků s feritovou deskou
(pohled z boku)

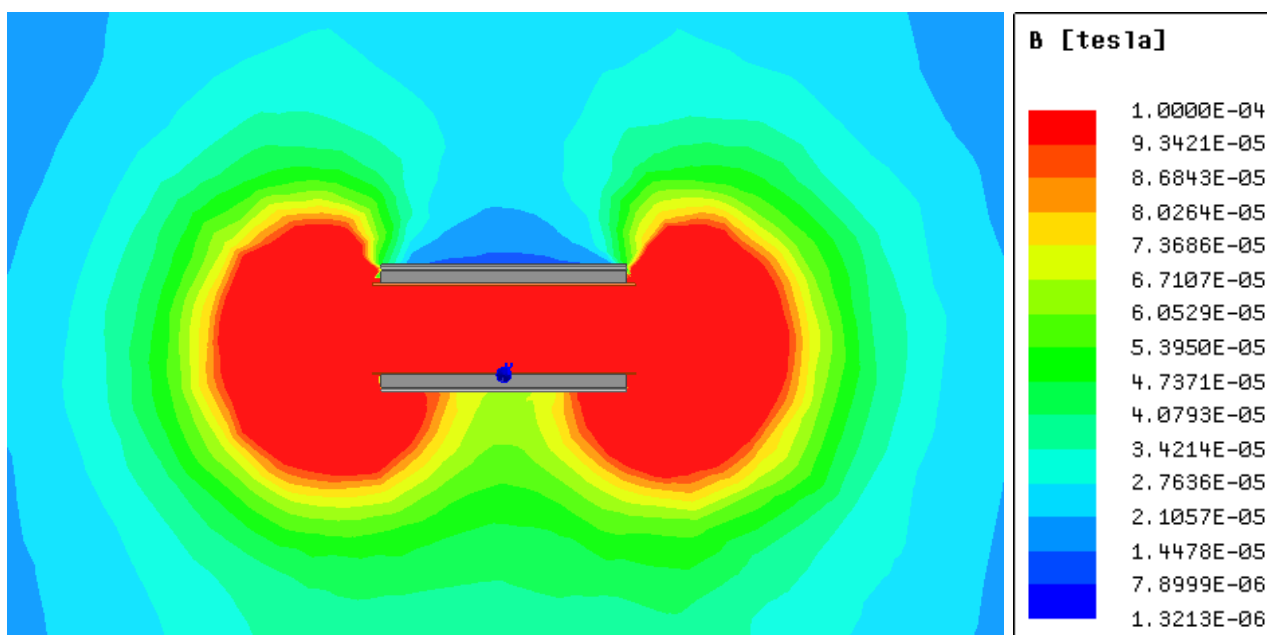
3.8 Systém o výkonu 11 kW

Jelikož i při snaze odstínit sestavu feritovou deskou, byla hodnota rozptylového pole 38 μT příliš vzdálená, bylo navrženo snížení požadovaného výkonu na 11 kW. Pro dosažení tohoto výkonu byl odpor zátěže nastaven na 785 Ω . Při napájecím napětí 230 V je efektivní proud primární cívkou 52,7 A.



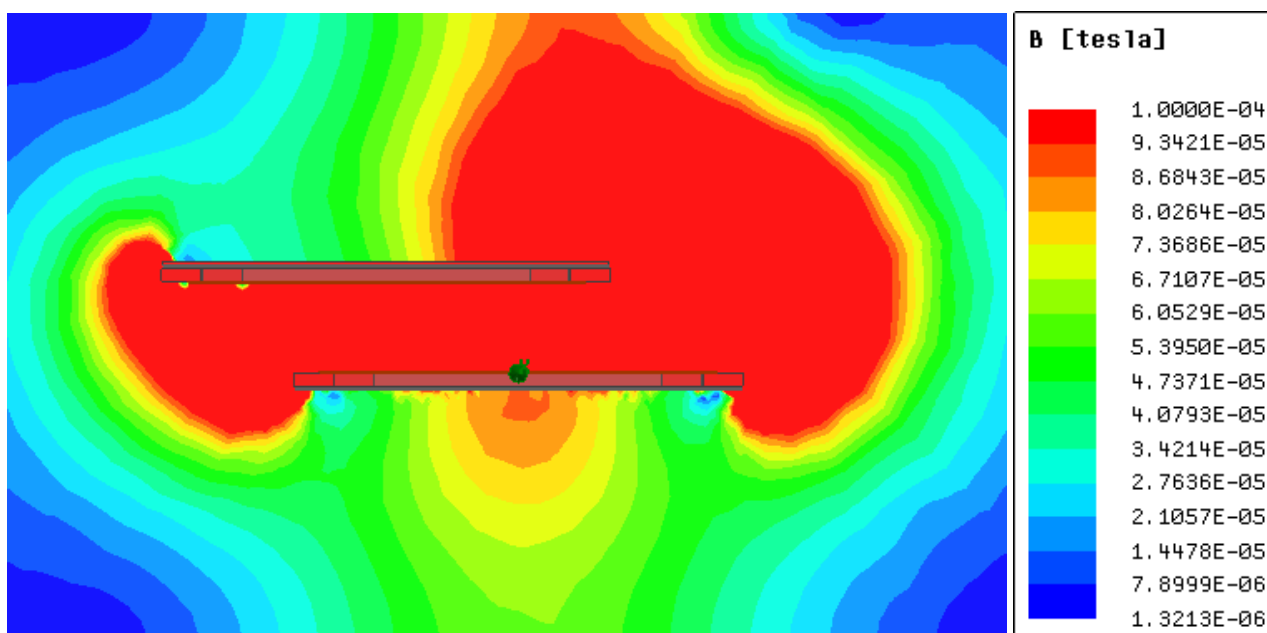
Obr. 34 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků při 11kW (pohled zepředu)

Simulace pak ukazují, že hodnota rozptylového pole 38 μT se už nad zarovnanými vazebnými prvky nevyskytuje. Tato hodnota se vyskytuje jen po stranách ve vzdálenosti přibližně 750 mm od středu cívek, kde se bude nacházet pod vozidlem a zespod vazebného prvku, kde tento tok ničemu neškodí. I při pohledu z boku (obr. 35) můžeme pozorovat, že limitní hodnoty nejsou příliš vysoko. Nicméně tok unikající ve směru Y se příliš dále redukovat nepodařilo.

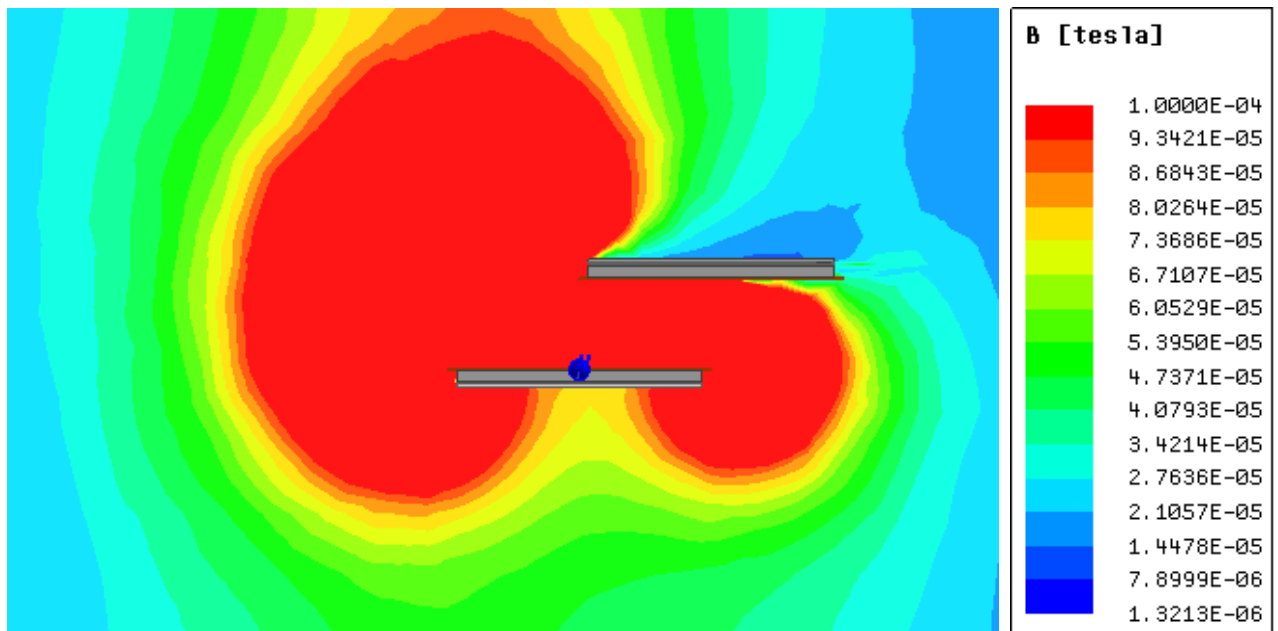


Obr. 35 Hustota rozptylového toku zarovnaných vazebných prvků při 11kW (pohled z boku)

Při vyosení vazebných prvků o 300 mm v ose X je vidět, že se nad pravou stranou zvýší hustota rozptylového toku. Na rozdíl od původního návrhu se hranice 38 μT nachází už ve vzdálenosti 900 mm. I červená oblast nejvyšší hustoty směrem vzhůru se nachází mnohem níž. I při vyosení o 300 mm v ose Y je vidět značné snížení rozptylového pole oproti původnímu návrhu.

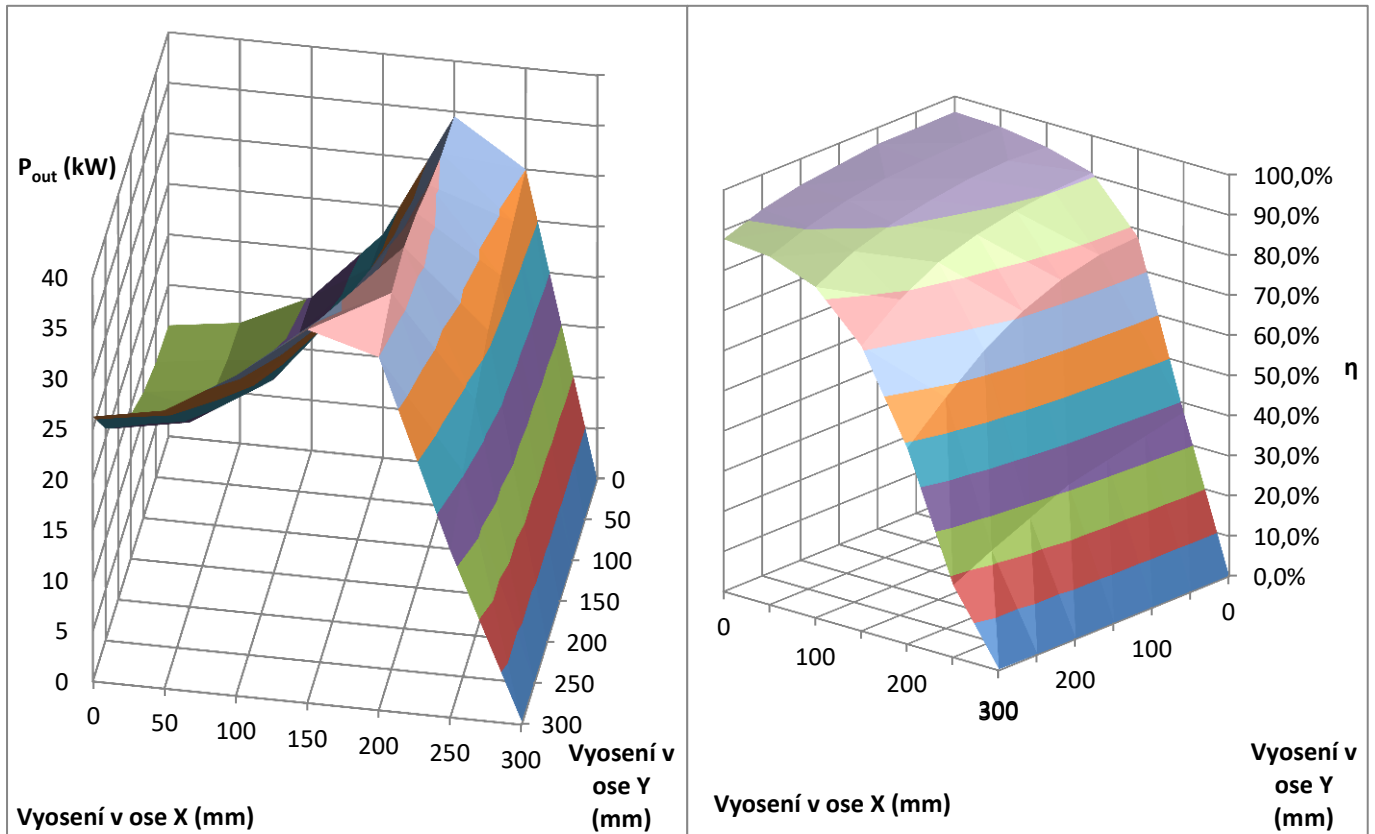


Obr. 36 Hustota rozptylového toku vyosených vazebných prvků při 11kW (pohled zepředu)



Obr. 37 Hustota rozptylového toku vyosených vazebných prvků při 11kW (pohled z boku)

Jelikož hodnota činitele vazby se u optimalizovaného modelu změnila jen nepatrně, byl tento rozdíl zanedbán a výstupní výkon a účinnost byl počítán podle činitele vazby původního návrhu. Z grafu 38a můžeme vidět, že i když je výkon v základní pozici nastaven na 11 kW, při vyosení o 200 mm v ose X se maximální výstupní výkon opět dostává na hodnotu 37 kW. Na rozdíl od původního návrhu je zde účinnost skoro 80%. Pokud zde porovnáme oblast nejvyššího výkonu s činitelem vazby, uvidíme, že nejvyššího výkonu dosujeme, pokud se činitel vazby k pohybuje mezi 0,1 - 0,15. Při porovnání účinnosti původního systému a optimalizovaného lze pozorovat, že v základní pozici účinnost stoupla z 90 % na 96 %. Účinnost kolem 80 % se navíc drží déle než u původního návrhu. Tato účinnost se drží až do vyosení o 200 mm v ose X a až po té strmě klesá k nule.



Obr. 38a Závislost výstupního výkonu optimalizovaného modelu na vyosení ve vzdálenosti 200 mm
b Závislost účinnosti optimalizovaného modelu na vyosení ve vzdálenosti 200 mm

4 Náklady na vazebné prvky

Jelikož se do budoucna uvažuje využití bezdrátového přenosu energie v praxi, bude se klást důraz na snižování nákladů, jak ze strany výrobců automobilů, tak ze strany ministerstva dopravy zřizující stavbu nových komunikací. Proto jsou v této kapitole nastíněny základní náklady na výrobu jednoho páru vazebných prvků.

Jelikož parametry feritů byly vybrány od společnosti JD&VD s.r.o., byla tato společnost vybrána jako dodavatel těchto feritů. Jeden feritový blok o rozměrech 93x30x28 mm je prodáván za 235,95 Kč. Vodiče byly poptávány u společnosti INKOSAS a cena licny s \varnothing jednotlivých drátů 0,1 mm se pohybuje kolem 720 Kč za kg pro velkoobjemový odběr. 1 kg odpovídá asi 16 m, což odpovídá ceně 45 Kč za metr. Hliníkový plech byl vybrán od společnosti KERAMET s.r.o. o rozměrech 5x1000x2000 mm v hodnotě 3400 Kč.

Tab. 2 Náklady původního návrhu

	cena	jednotka	použito	cena
feritový blok	235,95 Kč	ks	101	23 830,95 Kč
licna \varnothing 4 mm	45,00 Kč	m	72	3 240,00 Kč
Al deska	1 700,00 Kč	m ²	0,6	1 020,00 Kč
	cena jednoho prvku			28 090,95 Kč
	cena páru vazebných prvků			56 181,90 Kč

U optimalizovaného modelu je třeba započítat zesílené hliníkové stínění, přidané feritové tyče na okrajích vazebných prvků a feritové destičky. Protože 5 mm feritové destičky společnost JD&VD s.r.o. nenabízí, byl vybrán dodavatel Mouser Electronics, který nabízí tyto ferity při množstevní slevě za 99,84/ks. Tyto destičky jsou použity jen u sekundárního vazebného prvku.

Tab. 3 Náklady optimalizovaného modelu

	cena	jednotka	použito	cena
feritový blok	235,95 Kč	ks	119	28 078,05 Kč
licna \varnothing 4 mm	45,00 Kč	m	72	3 240,00 Kč
Al deska	1 700,00 Kč	m ²	1,8	3 060,00 Kč
feritová destička	99,84 Kč	ks	171	17 072,64 Kč
	cena sekundárního prvku			51 450,69 Kč
	cena páru vazebných prvků			85 828,74 Kč

Do celkových nákladů se navíc budou muset připočítat náklady na řídicí obvody (usměrňovač, zdroj napětí ...), které zde nejsou řešeny.

5 Závěr

Pro indukční přenos energie je důležité splňovat bezpečnostní předpisy dané ICIRP. Proto se velká část výzkumu zabývá snížením rozptylového pole. Původní kruhové cívky dosahovaly sice vysoké účinnosti, ale aby bylo zajištěno, že rozptylové pole bude v limitech, byly přenášeny nižší výkony. U nich se totiž hlavní cesta magnetického toku uzavírá i přes okolní prostředí. To je u double D eliminováno a hlavní magnetický tok je soustředěn do středů cívek. I zde se ovšem nachází rozptylový tok, který je třeba redukovat. Další výhodou je možnost přenosu energie za jízdy, nad čímž se do budoucna uvažuje.

V této práci byla navržena sestava podle dříve zjištěných poznatků tak, aby co nejvíce vyhovovala požadavkům pro přenos energie do vozidel. Původní návrh pro 22 kW dokázal energii přenést s účinností přes 90 %, ale hodnota rozptylového pole byla příliš vysoká. Po optimalizaci a snížení výkonu na 11 kW jsme rozptylové pole dostatečně odstínili tak, aby systém mohl být použit v praxi bez jakéhokoli vlivu na lidský organismus. Účinnost tohoto systému navíc stoupla nad 96 %. Pokud bychom chtěli přenášet vyšší výkony, bude potřeba vazebné prvky ještě dále optimalizovat. Jednou z dalších možných variant je zvýšení činitele jakosti cívek. Tím by se při zachování stejného výkonu snížil primární proud, který by vytvořil nižší hodnotu magnetického toku a tím i menší rozptylové pole.

Pokud by systémy bezkontaktního přenosu energie měli být instalovány do vozovek při takových to cenách, je potřeba zajistit, aby tyto systémy pracovali téměř bezchybně. Ať už z hlediska odstínění magnetického pole, činitele vazby a účinnosti, tak z hlediska řídicích obvodů, které budou napájet vazebné prvky podle toho, zda se bude v jejich okolí nacházet vozidlo a mnoha dalších. Také musí být zajištěna kompatibilita jednotlivých sekundárních prvků různých výrobců s primárními vazebnými prvky umístěných v silnicích. Tomu by mohlo pomoci vydání jednotného standardu, který by automobilky musely dodržovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] COVIC, Grant Anthony a John Talbot BOYS. *Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications* [online]. [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2264473. ISBN 10.1109/JESTPE.2013.2264473. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6517868/>
- [2] BUDHIA, Mickel, John T. BOYS, Grant A. COVIC a Chang-Yu HUANG. *Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems* [online]. [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/TIE.2011.2179274. ISBN 10.1109/TIE.2011.2179274. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6099605/>
- [3] BOSSHARD, Roman, Ugaitz IRURETAGOYENA a Johann W. KOLAR. *Comprehensive Evaluation of Rectangular and Double-D Coil Geometry for 50 kW/85 kHz IPT System* [online]. [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/JESTPE.2016.2600162. ISBN 10.1109/JESTPE.2016.2600162. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7542513/>
- [4] PEARCE, Matthew G. S., Grant A. COVIC a John T. BOYS. *Leakage and coupling of square and double D magnetic couplers* [online]. 2016 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/SPEC.2016.7846212. ISBN 10.1109/SPEC.2016.7846212. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7846212/>
- [5] IANNUZZI, D., L. FERRARO, P. MAUSSION a S. CAUX. *Magnetic design of inductive polarized couplers for IPT EV charging system* [online]. 2016 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841423. ISBN 10.1109/ESARS-ITEC.2016.7841423. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7841423/>
- [6] BOYS, John T. a Grant A. COVIC. *The Inductive Power Transfer Story at the University of Auckland* [online]. [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/MCAS.2015.2418972. ISBN 10.1109/MCAS.2015.2418972. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7110451/>
- [7] COVIC, Grant A., Michael L. G. KISSIN, Dariusz KACPRZAK, Niels CLAUSEN a Hao HAO. *A bipolar primary pad topology for EV stationary charging and highway power by inductive coupling* [online]. 2011 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6064008. ISBN 10.1109/ECCE.2011.6064008. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6064008/>
- [8] BUDHIA, Mickel, Grant A. COVIC, John T. BOYS a Chang-Yu HUANG. *Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging* [online]. 2011 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063826. ISBN 10.1109/ECCE.2011.6063826. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6063826/>
- [9] PEARCE, Matthew G. S., Hanyu GAO, Amrit RAMADUGU, Grant A. COVIC a John T. BOYS. *Robust double D topology for roadway IPT applications* [online]. 2017 [cit. 2018-03-14]. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096512. ISBN 10.1109/ECCE.2017.8096512. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8096512/>

- [10] FENG, Rui, Dariusz CZARKOWSKI, Francisco DE LEON a Qijun DENG. *Analysis and design of efficient IPT wireless charging systems for electric vehicle* [online]. 2017 [cit. 2018-03-14]. DOI: 10.1109/IECON.2017.8216920. ISBN 10.1109/IECON.2017.8216920. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8216920/>
- [11] MAYER, Daniel. *Úvod do teorie elektrických obvodů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1978.
- [12] LIN, Fei Yang, Adeel ZAHEER, Mickel BUDHIA a Grant A COVIC. *Reducing leakage flux in IPT systems by modifying pad ferrite structures* [online]. 2014 [cit. 2018-03-05]. DOI: 10.1109/ECCE.2014.6953632. ISBN 10.1109/ECCE.2014.6953632. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6953632/>

Přílohy

Příloha 1 – Technické informace k feritovým blokům



U 93/76/30 with I 93/28/30

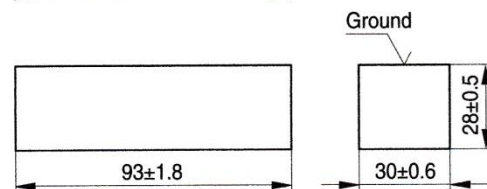
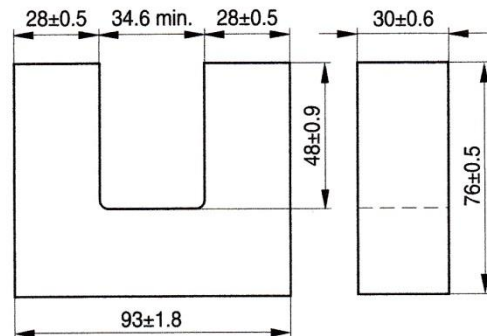
Cores

B67345

- Delivery mode: single units
- For power transformers >1 kW (20 kHz)

Magnetic characteristics (per set)

	UU 93/152/30	UI 93/104/30	
$\Sigma l/A$	0.42	0.31	mm ⁻¹
l_e	354	258	mm
A_e	840	840	mm ²
A_{min}	840	840	mm ²
V_e	297000	217000	mm ³
m	1500	1100	g/set



FUS0013-R

The A_L value in the table applies to a core set comprising two ungapped cores.

Material	A_L value nH	μ_e	P_V W/set	Ordering code
Combination UU 93/152/30				
N27	5400 +30/-20%	1800	< 16.0 (100 mT, 25 kHz, 100 °C)	B67345B0001X027
N87	5700 +30/-20%	1900	< 5.5 (100 mT, 25 kHz, 100 °C)	B67345B0001X087
N97	5700 +30/-20%	1900	< 4.0 (100 mT, 25 kHz, 100 °C)	B67345B0001X097
Combination UI 93/104/30				
N27	7400 +30/-20%	1850	< 12.0 (100 mT, 25 kHz, 100 °C)	B67345B0001X027 (U) B67345B0002X027 (I)
N87	7900 +30/-20%	1930	< 4.0 (100 mT, 25 kHz, 100 °C)	B67345B0001X087 (U) B67345B0002X087 (I)

Please read *Cautions and warnings* and *Important notes* at the end of this document.

2 5/17

Příloha 2 – Technické informace k feritovým destičkám



ELP 64/10/50 with I 64/5/50

Core (without clamp recess)

B66295

Core set EILP 64

Combination:

ELP 64/10/50 with I 64/5/50

- To IEC 62317-9
- Delivery mode: single units

Magnetic characteristics (per set)

$$\Sigma l/A = 0.13 \text{ mm}^{-1}$$

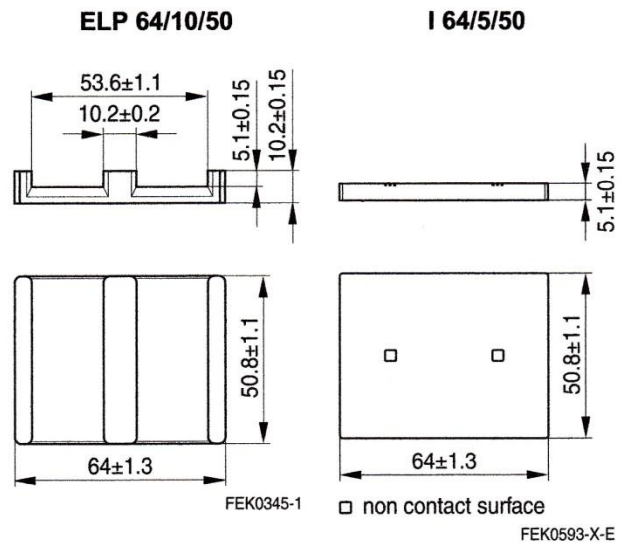
$$l_e = 69.7 \text{ mm}$$

$$A_e = 519 \text{ mm}^2$$

$$A_{\min} = 518 \text{ mm}^2$$

$$V_e = 36200 \text{ mm}^3$$

Approx. weight 185 g/set



Ungapped

Material	A_L value nH	μ_e	B_S^* mT	P_V W/set	Ordering code (per piece)
N49	8900 ±30%	950	250	< 9.3 (50 mT, 500 kHz, 100 °C)	B66295G0000X149 (ELP core) B66295K0000X149 (I core)**
N87	14000 ±25%	1450	300	< 23.0 (200 mT, 100 kHz, 100 °C)	B66295G0000X187 (ELP core) B66295K0000X187 (I core)**

* $H = 250 \text{ A/m}$; $f = 10 \text{ kHz}$; $T = 100 \text{ °C}$

** Plate-type tool

Other A_L values/air gaps and materials available on request – see Processing remarks on page 4.

Calculation factors (for formulas, see "E cores: general information")

EILP 64:

Material	Relationship between air gap – A_L value		Calculation of saturation current			
	K1 (25 °C)	K2 (25 °C)	K3 (25 °C)	K4 (25 °C)	K3 (100 °C)	K4 (100 °C)
N87	835	-0.790	1316	-0.796	1203	-0.873

Validity range: K1, K2: $0.10 \text{ mm} < s < 2.00 \text{ mm}$
 K3, K4: $480 \text{ nH} < A_L < 4800 \text{ nH}$

Please read *Cautions and warnings* and
Important notes at the end of this document.