

**Fakulta elektrotechnická
Regionální inovační centrum elektrotechniky**

Konstrukce třífázových tlumivek

Pracoviště: RICE – elektrické stroje
Číslo dokumentu: 22190-034-2021
Typ zprávy: Výzkumná zpráva / zkušební protokol / zpráva o provedení analýzy
Řešitelé: Radek Čermák, Jiří Dražan, Bohumil Skala
Hlavní řešitel: Bohumil Skala
Počet stran: 28
Datum vydání: 29. 9. 2021
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering - Robotics and automatic control

Zadavatel / zákazník:

ELZAT sro.
Rožmitál pod Třemšínem
Česká republika

František Henkl

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Research and Innovation Centre
for Electrical Engineering
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Bohumil Skala
tel. 377634 473
skalab@fel.zcu.cz

Práce vznikla s podporou projektu CZ.01.1.02/0.0/0.0/20_321/0024444

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá řešením výrobců elektrotechnických plechů, které je možné použít na výrobu třífázové tlumivky. Ve zprávě jsou dále uvedeny různé technologie skládání plechů a popsány jejich výhody a nevýhody. Poslední část zprávy obsahuje popis vzduchové mezery a její vliv na návrh tlumivky.

Klíčová slova

Tlumivka, Vzduchová mezera, elektrotechnické plechy, magnetické jádro

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

The design of three-phase chokes

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report lists a manufacturers of electrical steel that can be used for a three-phase chokes. In second part, the report describes various types of magnetic cores and discuss their advantages and disadvantages. The last part of the report contains a description of the air gap and its influence on the choke design.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Choke, air gap, electrical steel, magnetic core

Obsah

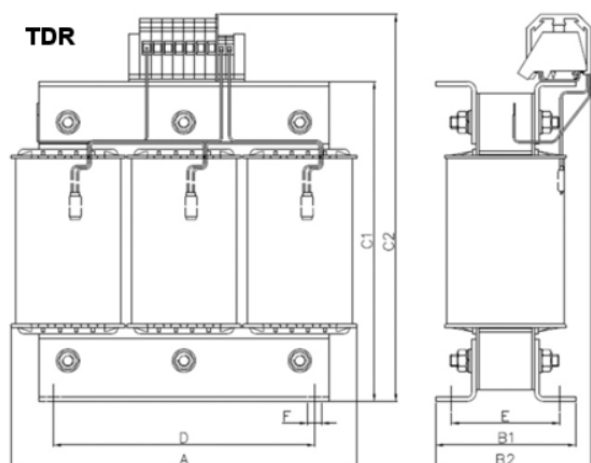
1	ÚVOD	4
2	REFERENČNÍ HODNOTY	5
3	ELEKTROTECHNICKÉ PLECHY	6
3.1	TECHNOLOGIE SKLÁDÁNÍ MAGNETICKÝCH JADER	6
3.1.1	<i>Jádra složená z elektrotechnických plechů</i>	<i>6</i>
3.1.2	<i>Dělená magnetická jádra</i>	<i>7</i>
3.1.3	<i>UNICORE jádra</i>	<i>9</i>
3.2	DODAVATELÉ ORIENTO VANÝCH ELEKTROTECHNICKÝCH PLECHŮ	14
3.2.1	<i>Waasner [2].....</i>	<i>14</i>
3.2.2	<i>AK steel [10]</i>	<i>15</i>
3.2.3	<i>Thessenkrupp [11].....</i>	<i>16</i>
3.2.4	<i>Stalprodukt S.A [7].....</i>	<i>17</i>
3.2.5	<i>JFE steel corporation [12].....</i>	<i>17</i>
3.2.6	<i>Ostatní výrobci a dovozci.....</i>	<i>18</i>
	<i>Příloha A</i>	<i>19</i>
4	VOLBA VZDUCHOVÉ MEZERY	20
4.1	DĚLENÁ VZDUCHOVÁ MEZERA	21
4.2	DOPORUČENÉ ZDROJE.....	25

1 Úvod

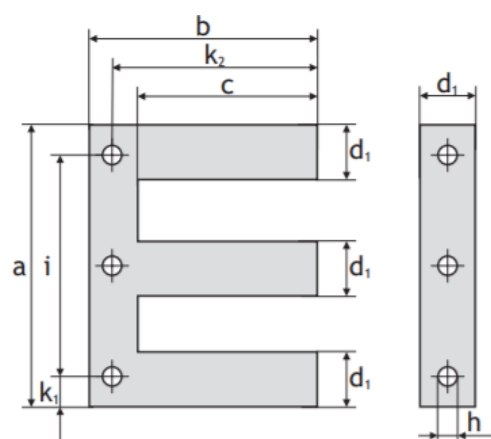
Tlumivky jsou důležitou součástí energetické sítě. Využívají se zejména pro kompenzaci jalového výkonu či potlačení nežádoucích vyšších harmonických složek (dolní propust'). S ohledem na požadované vlastnosti lze konstrukci tlumivky provést velkým množstvím způsobů, přičemž ty z nich, které jsou relevantní pro tento projekt, jsou uvedeny v této výzkumné zprávě.

2 Referenční hodnoty

Dle zadání úkolu je za referenční tlumivku považována dekompenzační tlumivka od české firmy Elektrokov, a.s. Znojmo [1] (obr. 1) s parametry uvedenými v tabulce 1. Podle dostupných informací je tato tlumivka složena z elektrotechnických plechů typu EI od německé firmy Waasner. Rozměry použitých plechů jsou uvedeny v tabulce 2. Momentálně nám není znám konkrétní typ používaných plechů, ale dle dostupných datasheetů vyrábí firma Waasner 26 typů neorientovaných elektrotechnických plechů o třech různých tloušťkách. Dostupné parametry těchto plechů jsou uvedeny v tabulce 3. B-H charakteristika nebo charakteristika závislosti ztrát na magnetické indukci nebyla v datasheetu přiložena a lze se domnívat, že detailnější informace o těchto plechách jsou dostupné pouze na vyžádání.



Obr. 1 Referenční tlumivka [1]



Obr. 2 Elektrotechnické plechy EI [2]

Tabulka 1 Parametry referenční tlumivky [1]

Typ	Q (kVAr)	I _n (A)	L (mH)	ΔP _{max} (W)	ΔP _{max} (%)	ΔT (°C)	Svorka (mm ²)		
TTC 34075 – 0026	5	7,22	101,9	155	3,1	70	4		
	Rozměry (mm)						Hmotnost (kg)		
	A	B1	B2	C1	C2	D	E	F	24
	239	132	145	220	270	180	110	10x18	

Tabulka 2 Rozměry referenčních plechů [2]

3 UI 120 / EI 200/200	A	b	c	d ₁	h	i	k ₁	k ₂
	200	160	120	40	11	160	20	140

Tabulka 3 Dostupné mag. vlastnosti neorientovaných elektrotechnických plechů od firmy Waasner [2]

Tloušťka (mm)	Magnetické ztráty 50 Hz (W/kg) B=1,5 T	Hodnota B (T) při H = 800 A/m			Minimální činitel plnění železa
		H = 2500 A/m	H = 5000 A/m	H = 10000 A/m	
0,35	2,35 – 3,3	1,49	1,6	1,7	0,95
0,5	2,5 - 8	1,49 – 1,6	1,6 – 1,7	1,7 – 1,77	0,97
0,65	3,1 - 8	1,49 – 1,6	1,6 – 1,7	1,7 – 1,78	0,97

3 Elektrotechnické plechy

Pro výrobu magnetických obvodů, které jsou určeny pro nízké frekvence se běžně používají dvě technologie zpracování elektrotechnických plechů:

- **Orientované elektrotechnické plechy** – Plechy válcované za studena. Mají anizotropně orientovanou strukturu, která se snaží maximálně přiblížit Gossově textuře. Plechy mají vynikající magnetické vlastnosti ve směru válcování a hodí se tak na výrobu transformátorů a tlumivek. Pro jejich označení se běžně používá zkratka GOES z anglického grain oriented electrical steel.
- **Neorientované elektrotechnické plechy** – Plechy válcované za tepla. Jejich magnetické vlastnosti nejsou závislé směru magnetického pole. Používají se k výrobě malých transformátorů a točivých elektrických strojů. Pro jejich označení se používá zkratka NGOES z anglického non-grain oriented electrical steel.

Kromě těchto typů existují také slitiny Ni-Fe (permalloy), práškové kovové materiály a kyslíčnickové materiály (ferity). Tyto technologie však nejsou příliš vhodné pro magnetické jádro nízkofrekvenčních tlumivek.

Pro volbu vhodných elektrotechnických plechů je nejprve vhodné určit vhodno technologii skládání magnetického obvodu tlumivky.

3.1 Technologie skládání magnetických jader

Magnetická jádra složená z elektrotechnických plechů lze vyrobit několika způsoby z nich všechny mají své výhody a nevýhody a záleží tak na konkrétní aplikaci a požadované ekonomické náročnosti hotového výrobku.

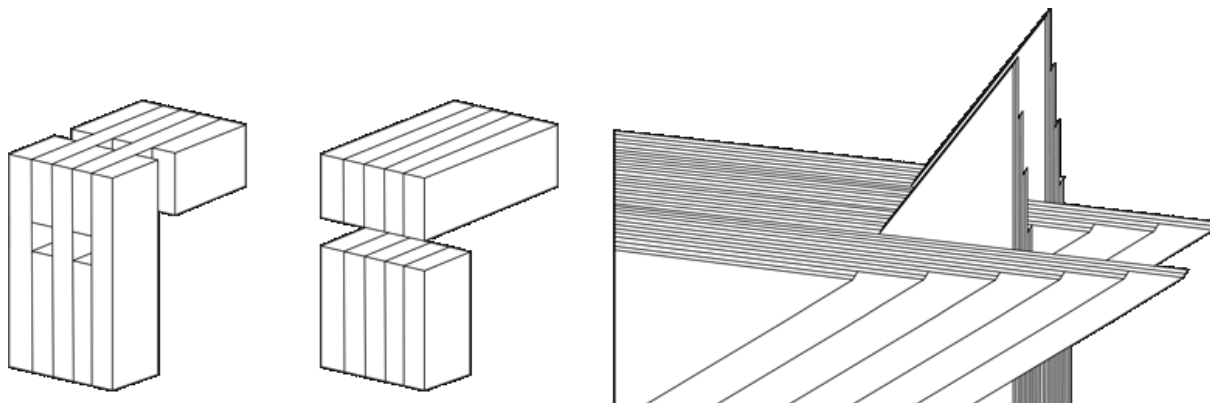
3.1.1 Jádra složená z elektrotechnických plechů

Jedná se o klasickou technologii skládání magnetických jader. Jádra se skládají z výstřižků železných plechů. Pro třífázovou tlumivku je běžně používaný tvar typu EI. Lze koupit již hotová jádra o rozměrech určených výrobcem nebo zakoupit samotnou ocel a plechy o požadovaných rozměrech z ní vyříznout.

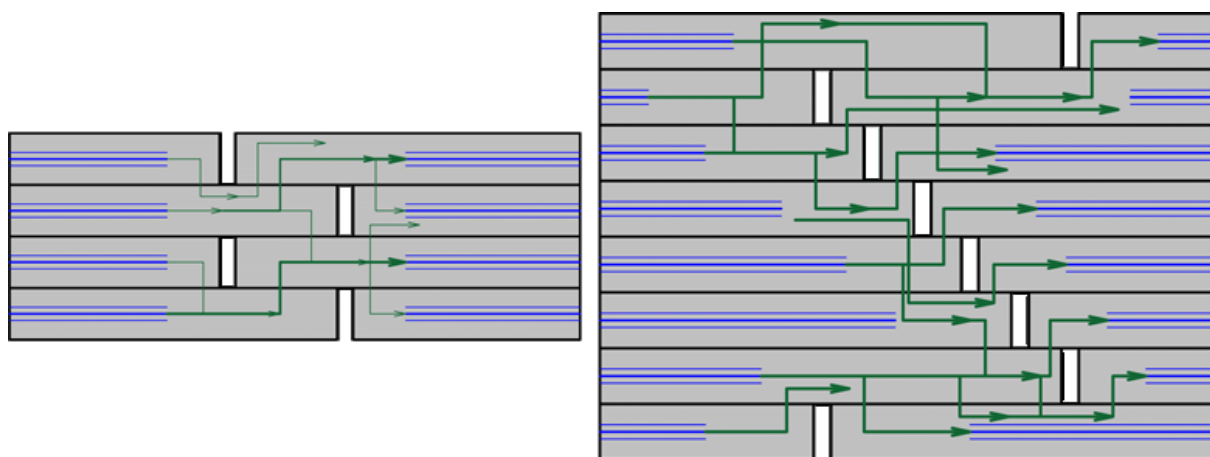
Tato technologie je lety prověřená a jádra jsou snadná na sestavení, ale jejich nevýhodou je nutnost použití neorientovaných elektrotechnických plechů, které mají vyšší magnetické ztráty a delší čas potřebný při skládání jádra.

Mezi dodavatele, kteří mají v nabídce již hotová EI jádra patří například již dříve zmíněná firma Waasner, která má rozsáhlý katalog hotových magnetických jader. V nabídce má EI plechy o šířce 30 až 400 mm.

V minulosti se plechy skládali tzv. natupo (obr. 3). Tato metoda má však tak významné ztráty, že se dnes již v podstatě nepoužívá. Pro snížení magnetických ztrát se dnes plechy skládají metodou přeplátování. Tato metoda se dá rozdělit na non step-lap a step lap. V těchto metodách jsou plechy skládány tak, aby vytvořili odstupňovanou vzduchovou mezeru, díky které magnetický tok přechází do vedlejšího plechu, aniž by přecházel přes vzduchovou mezeru viz obr. 4. Obecně lze říci, že čím větší počet odstupňovaných plechů, tím menší magnetické ztráty, ale je potřeba zdůraznit že s počtem stupňů roste čas potřebný na sestavení jádra.



Obr. 1 Technologie skládání elektrotechnických plechů zleva: non step-lap, natupo, step lap [3]



Obr. 2 Průchod magnetického toku zleva: Non step-lap, step-lap [3]

Na obr. 4 je znázorněn průchod magnetického toku v jádře typu non step lap a step lap. Protože v jádře typu non step lap jsou pouze dvě konfigurace plechů, nastane po přesunutí toku do sousedního plechu přesycení. Kvůli těmto přesycením se zvýší lokální magnetické ztráty což má za následek vyšší úroveň hluku a část toku musí projít přes vzduchovou mezeru, čímž dojde k úbytku indukovaného napětí.

V jádrech typu step lap se tok dělí do více plechů a dojde tak k rovnoměrnějšímu rozdělení magnetického toku. Díky tomu dojde ke snížení hluku a magnetické ztráty se ve srovnání s non step lap sníží o 5 % až 8 %. [3]

3.1.2 Dělená magnetická jádra

Dělená jádra jsou vyráběna navíjením elektrotechnické pásky na otáčející se trn. Navinutý magnetický obvod je slepen syntetickou pryskyřicí a rozříznut. Vlastnosti výsledného děleného jádra záleží na velikosti vzduchové mezery dosedacích ploch, vlastnostech použité oceli a

celkové geometrii. Velkou výhodou je možnost použít orientovanou elektrotechnickou ocel. Další výhodou těchto jader je jejich tvar, který více odpovídá tvaru magnetického pole a nedochází tak k přesycování v ostrých rozích. Společnosti, která tato jádra vyrábějí uvádí jako další výhody nízkou hlučnost, jednoduchost montáže a nižší měrné ztráty oproti skládaným magnetickým jádrům. [4]



Obr. 3 Vinutá třífázová magnetická jádra [4]

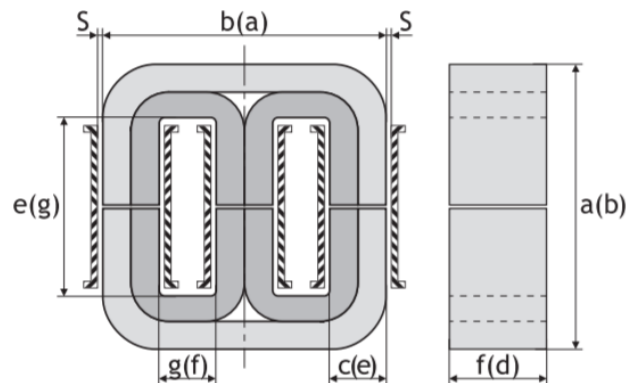
Výrobci dělených magnetických jader:

- **Therma FM** – Česká výrobní společnost podnikající v oblasti elektrotechnických plechů. Vyrábí dělená jádra v několika provedeních (jednostupňové, víceúhňové, jednofázové, trojfázové a jiné tvary). Výrobce nemá uvedeno, z jakých konkrétních plechů jádra vyrábí, ale uvádí zaručené měrné ztráty pro jádra z plechů o tloušťce 0,27 – 0,3 mm při $B_{max} = 1,7 \text{ T}$ a $f = 50 \text{ Hz} \rightarrow 2,2 \text{ W/kg}$. Společnost má v nabídce několik jader o standardizovaných rozměrech v podobném rozpětí jako níže zmíněná firma Waasner. [5]
- **Liberty Technotron s.r.o** – Dceřiná společnost Liberty Ostrava a.s sídlící ve Frýdku – Místku. Nabízí výrobu třífázových dělených jader dle požadavků zákazníka. Jádra jsou vinuta z oceli M165 – 35S od firmy Waasner. Společnost má v nabídce tři typy jader, ke kterým při $f=50 \text{ Hz}$ garantuje vlastnosti uvedené v tabulce 4. [4]

Tabulka 4 Dostupné magnetické vlastnosti vinutých jader od firmy Liberty Technotron s.r.o [4]

Typ jádra	Garantované ztráty (W/kg)	Intenzita magnetického pole pro $B = 1,5 \text{ T (A/m)}$
C 08001 – 10000	2,5	400
C 010001 – 26003	2,2	350
C 26004 – 90005	2,2	300

- **Waasner** – Již dříve zmíněná německá firma. Nabízí třífázová i jednofázová vinutá jádra o předem daných rozměrech. Společnost má v nabídce celkem 32 třífázových jader. V tabulce 5 jsou uvedeny rozměry pro nejmenší a největší dostupná jádra. [2]



Obr. 4 Vinuté magnetické jádro od firmy Waasner [2]

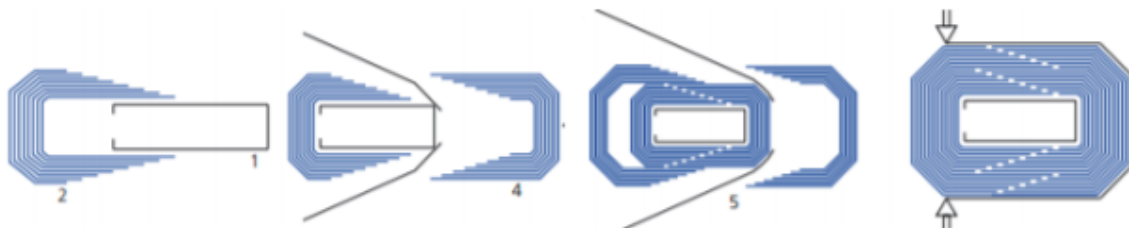
Tabulka 5 Maximální a minimální rozměry skládaných mag. jader od firmy Waasner [2]

Typ	Rozměry (mm)								l_{FE} (cm)	A_{FE} (cm ²)	m_{FE} (kg)
	a	b	c	e	f	g	r	s			
3U 1.1	53,7	50,7	9,9	32,5	10,1	10	1,5	0,3	18,4	0,82	1,115
3U 14.3	406,2	400,8	79,6	243	138,7	80	3	0,8	144	101	111

3.1.3 UNICORE jádra

Nová technologie skládání magnetických obvodů, která má podle výrobců nahradit výše představená dělená magnetická jádra. Vyrábějí se z orientovaných plechů a díky speciální konstrukci mají o 20 % až 40 % menší měrné ztráty než vinutá jádra. Jejich jedinou nevýhodou je omezená minimální velikost vnitřního oka. Specifikem těchto jader je že mohou být dodávána v žíhaném i nežíhaném stavu. Při dodatečném žíhání se ztráty mohou snížit o 10 % až 30 %.

Při výrobě UNICORE jader je použit speciální stroj, který ohýbá a skládá plechy do svazků které jsou do sebe následně vloženy. Tento proces je rychlý, přesný a nevyžaduje mnoho speciálních nástrojů. [6], [8]

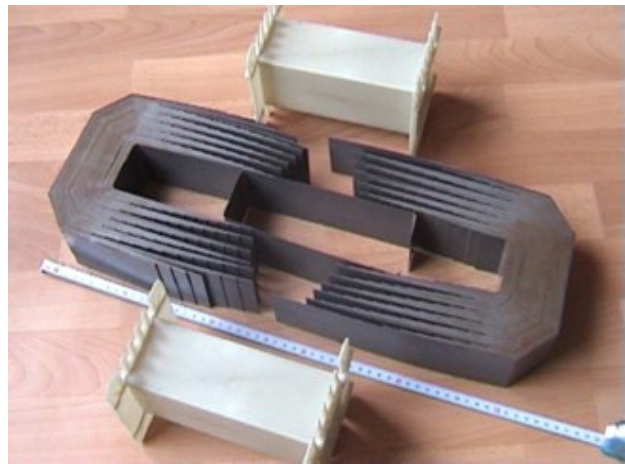
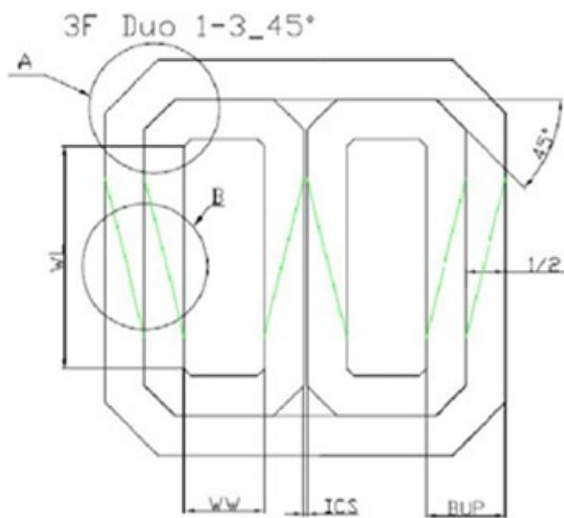


Obr. 5 Postup skládání UNICORE jader

Mezi jednoho z největších dodavatelů těchto typů jader v České Republice patří společnost Liberty Technotron s.r.o. Společnost uvádí že je schopna vyrobit jádro podle požadavků zákazníka. [6]

- **DUO, DG** – Vzduchová mezera je rozdělena po délce sloupku jádra. Skládá se ze dvou stupňovitě rozdělených polovin – samčí a samičí – které se postupně skládají do cívek.

Poslední pásek slouží jako stahovací. Na obrázku je vyfoceno takto vyrobené jádro a na obr. 8 je znázorněno třífázové DUO jádro se zeleně vyznačenými vz. mezerami.



Obr. 6 Jádro UNICORE DUO [6]

DUO jádra jdou dále rozdělit podle typu provedení

- DUO 1 - Jeden závit na jednu vrstvu
 - Nejnižší ztráty
 - Delší montáž než u ostatních UNICORE jader
- DUO 2 - Dva závity na vrstvu
 - Kombinace mezi nejnižšími ztrátami a nejkratší dobou montáže
- DUO 3 - Tři závity na vrstvu
 - Rychlá montáž jádra do cívek



DUO 1



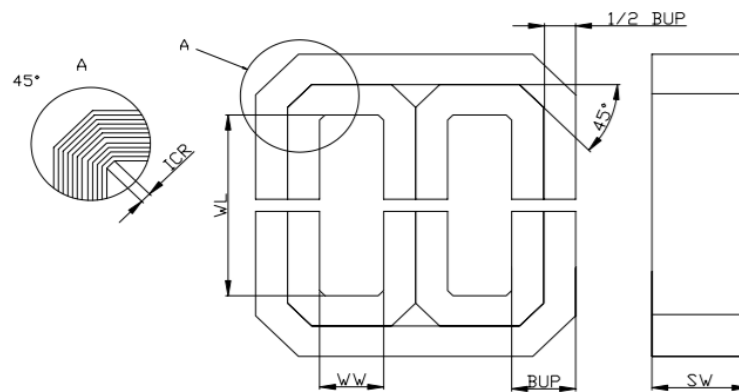
DUO 2



DUO 3

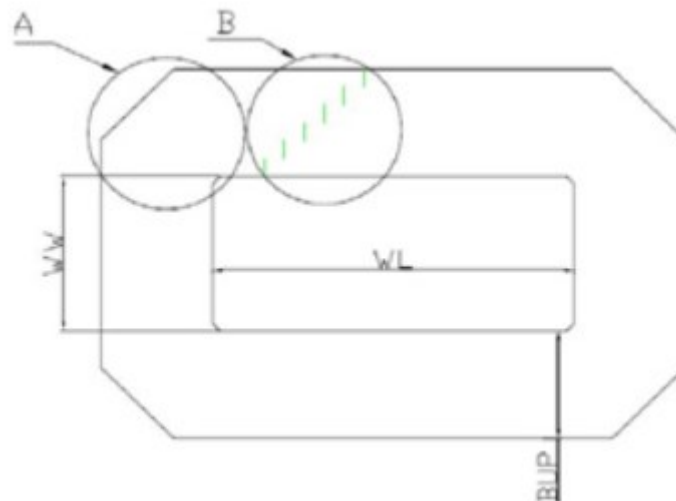
Obr. 7 Typy provedení UNICORE jader DUO [6]

- **UNCUT** – jádra zcela bez dělicí roviny. Náhrada nedělených vinutá jádra. Vhodná pro pravoúhlé impulzní transformátory a napěťové transformátory
- **BUTT** – Technologie vhodná pro jedno a třífázové tlumivky. Na rozdíl od jader typu DUO má BUTT formovány jednotlivé vrstvy s cílem vytvoření rovné plochy. Oproti vinutým magnetickým jádrům jsou BUTT jádra výrazně levnější.



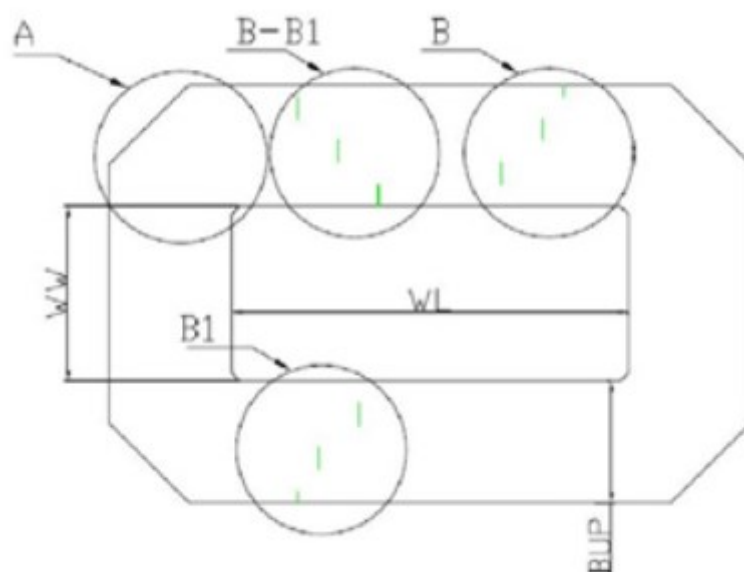
Obr. 8 UNICORE BUTT [6]

- **Step BUTT** – Vzduchová mezera těchto jader je designována jako schody. Hodí se pro transformátory s výkonem vyšším než 1 kVA.



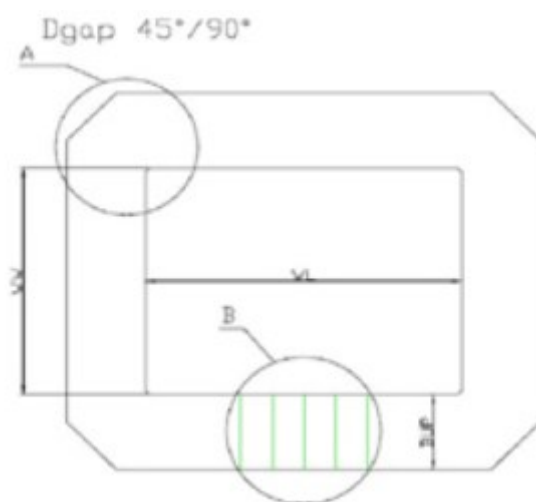
Obr. 9 UNICORE step BUTT [6]

- **Combi step BUTT** – Jednotlivé pakety jsou přehozeny proti sobě tak, aby vzniklé mezery byly na opačných stranách jádra. Vzniklé mezery jsou tedy umístěny vždy ob jeden paket. Jádra tohoto typu mají maximální redukci v měrných ztrátách a hluku v kategorii BUTT.



Obr. 10 UNICORE Combi step BUTT [6]

- **DGAP jádra** – Vzduchová mezera je umístěna kolem jedné nohy jádra. Takto řešená UNICORE jádra mají nejnižší magnetické ztráty. Hodí se pro nízko ztrátové aplikace.



Obr. 11 UNICORE DGAP [6]

Společnost provedla srovnávací měření mezi klasickými vinutými jádry a jádry typu UNICORE DUO 2 a 3 v žíhaném a nežíhaném provedení. Nežíhané UNICORE jádro má dle měření o něco vyšší ztráty, ale jeho cena by měla být nižší. Žíhaná UNICORE jádra mají naopak až o 22% menší měrné ztráty než vinuté jádro. Bohužel není k dispozici měření jádra DUO 1, které by mělo mít ztráty nejnižší.

Tabulka 6 Srovnání magnetických ztrát vinutých jader a UNICORE jader [6]

Typ		Vinuté jádro	DUO 2		DUO 3	
Provedení		Žíhané	Žíhané	Nežíhané	Žíhané	Nežíhané
Měrné ztráty (W/kg)	1,5 T	1,2	0,95	1,3	1	1,4
	1,7 T	1,85	1,45	1,8	1,55	1,95

Firma je schopna vyrobit jádro s úhlem rohu 45° , 30° a 90° . Při výrobě těchto jader je nutné dále respektovat minimální rozměry viz tabulka. Společnost neuvádí, z jakých konkrétních elektrotechnických plechů jádra vyrábí.

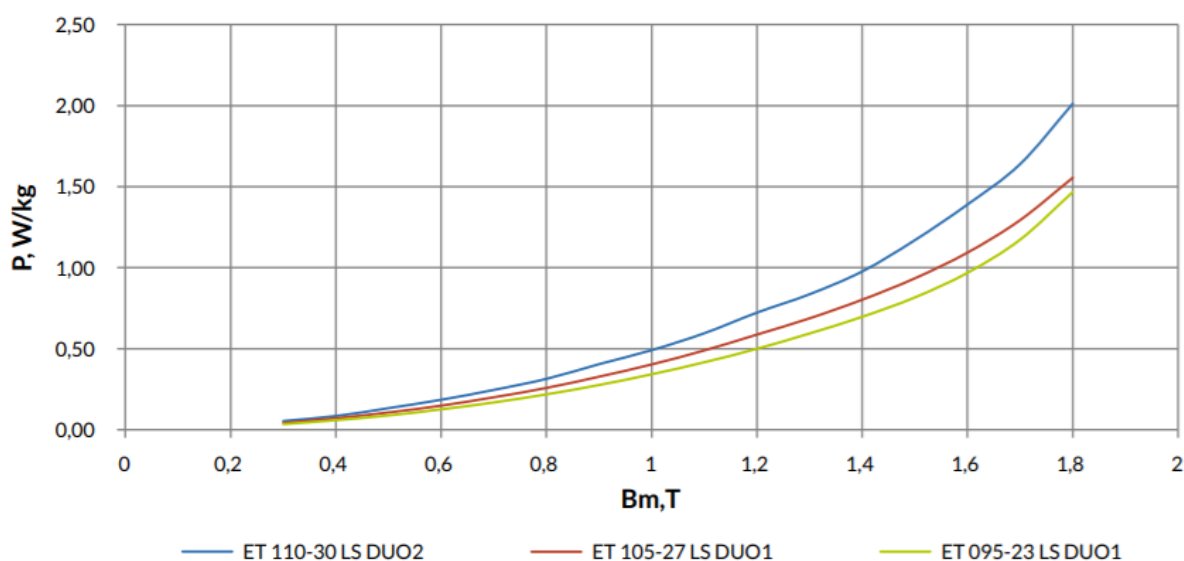


Obr. 12 Dostupné úhly v rozích pro technologii UNICORE zleva: 45° , 30° , 90° [7]

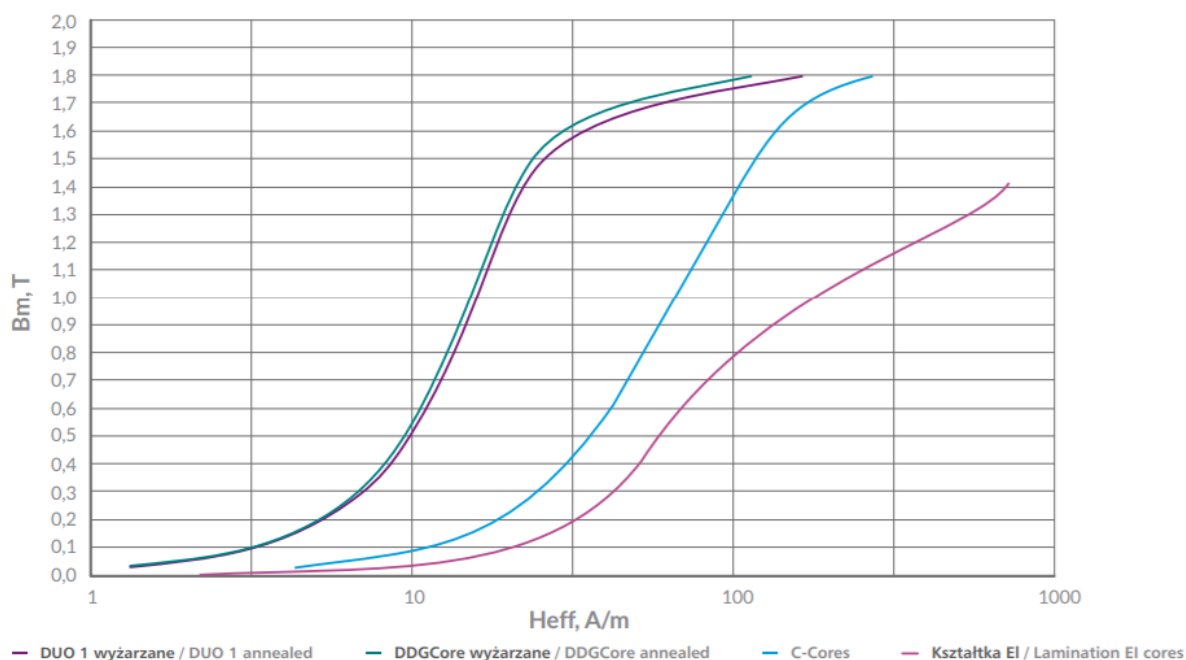
Tabulka 7 Minimální rozměry UNICORE jader [6]

Rozměr	Minimum (mm)	Maximum (mm)
Délka okna	80	neomezená
Šířka okna	40	neomezená
Šířka pásu	20	300
Navinutá vrstva	Tloušťka pásu	neomezená

Dalším velkým výrobcem jader UNICORE je již výše zmíněná polská firma Stalprodukt S.A. Společnost nabízí UNICORE jádra v provedení DUO, UNCUT, BUTT a Step BUTT. Pro výrobu platí stejná konstrukční omezení jako u společnosti Liberty Technotron s.r.o viz tabulka 7. Společnost přikládá naměřenou ztrátovou charakteristiku pro třífázová UNICORE jádra vyrobených z různých materiálů a B-H charakteristiku, ve které srovnává technologii UNICORE (žíhaná i nežíhaná jádra), skládaná jádra a vinutá jádra. [7]



Obr. 13 Graf závislosti ztrát na magnetické indukci pro různé materiály od firmy Stalprodukt S.A [7]



Obr. 14 B-H charakteristika žíhaných a nežíhaných jader UNICORE, vinutých jader (C-Cores) a skládaných EI jader [7]

Dalšími společnostmi, které nabízejí technologii UNICORE je například česká společnost Therma FM [8] a australská společnost AEM UNICORE[9].

3.2 Dodavatelé orientovaných elektrotechnických plechů

Ze srovnání jednotlivých technologií výroby magnetických jader v kapitole 3.1 se jako nejvhodnější jeví použití technologie UNICORE. Protože pro takto vyrobená jádra lze použít orientované elektrotechnické plechy byla provedena rešerše zaměřena zejména na výrobce, kteří mají tyto informace veřejně k dispozici.

3.2.1 Waasner [2]

Německá firma, která má v nabídce orientované i neorientované elektrotechnické plechy. Vlastnosti těchto plechů jsou uvedeny v tabulce 8. Bližší informace nejsou veřejně k dispozici. [2]

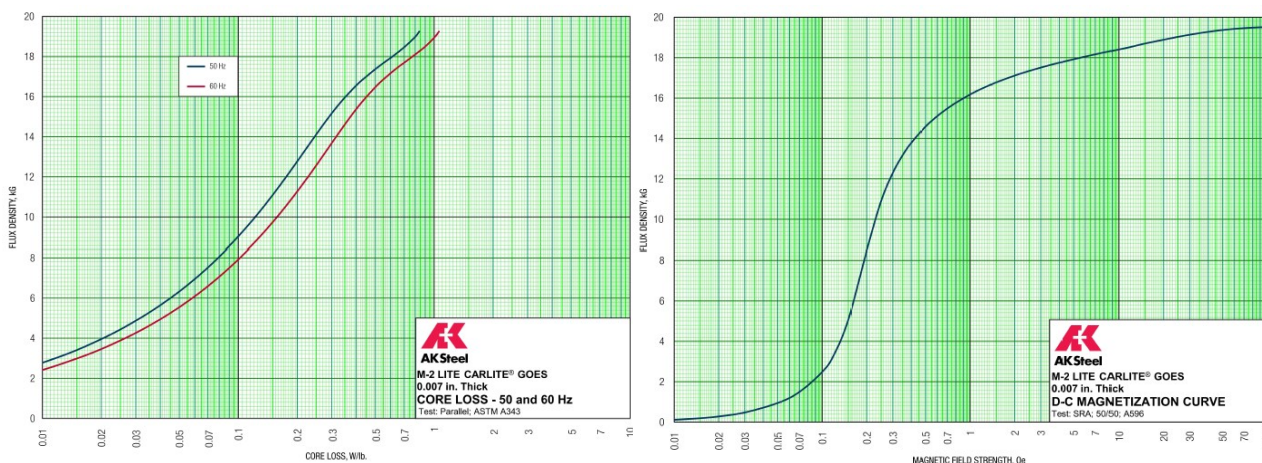
Tabulka 8 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Waasner [2]

Typ	Tloušťka (mm)	Magnetické ztráty 50 Hz (W/kg)		Hodnota B (T) při H = 800 A/m	Minimální činitel plnění železa
		1,5 T	1,7 T		
M 127 - 23 S	0,23	0,8	1,27	1,75	0,95
M 140 - 27 S	0,27	0,89	1,4	1,75	0,95
M 150 – 30 S	0,3	0,97	1,5	1,75	0,96
M 165 – 35 S	0,35	1,11	1,75	1,75	0,96

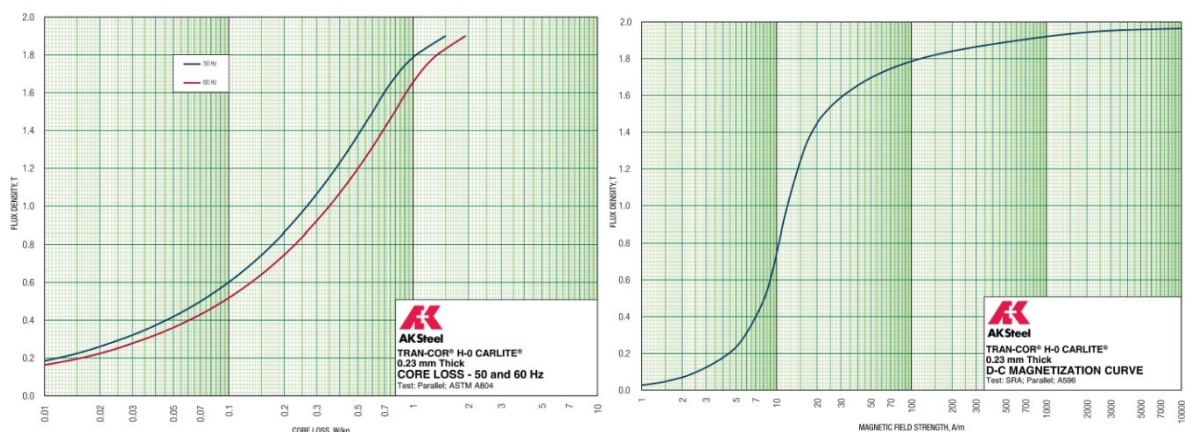
3.2.2 AK steel [10]

Americká firma s dlouholetou tradicí. Firma získala řadu ocenění a patentů a hlásí se k několika technologickým prvenstvím. Firma dodává neorientované elektrotechnické plechy řady DI-MAX a orientované elektrotechnické plechy následujících řad: [10]

- **LITE CARLITE and Mill Anneal** – Určeny pro velké generátory a transformátory. Plechy jsou určeny pro zařízení, které mají indukované napětí max. 10 V na závit. Dle datasheetu vykazuje řada Mill Anneal nepatrně vyšší ztrátové číslo při vyšších hodnotách magnetické indukce. V datasheetu jsou přiloženy ztrátové charakteristiky, BH charakteristiky a výkonové křivky. Na obr. 17 je ztrátová charakteristika a B-H charakteristika pro plechy M-2 LITE CARLITE o tloušťce 0,18 mm.
- **CARLITE** – Obdobné vlastnosti jako a využití jako předchozí řada, ale díky lepší izolaci jsou určeny pro zařízení s vyšším indukovaným napětím na závit. Díky tomu mají vyšší magnetické ztráty než v předchozí řada.
- **TRAN-COR H a TRAN-COR X** – Vyšší řady elektrotechnických plechů. Při jejich výrobě je použita závěrečná úprava laserem, která rozdělí magnetické domény a sníží tak vzdálenost o kterou se musí domény pohybovat při průchodu střídavého magnetického pole. Nabízí nižší magnetické ztráty (až o 0,3 W/kg) a vyšší permeabilitu než předchozí řady. V této řadě jsou uvedeny dva typy plechu Carlite a DR, zatímco CARLITE je vhodná pro všechny typy transformátoru, tak řadu DR lze použít pouze u těch kde není vyžadována dodatečná úprava žiháním ke snížení vnitřního pnutí (stress relief annealing treatment). Výhoda řady DR jsou až o 0,15 W/kg nižší ztráty než u řady CARLITE.



Obr. 15 Charakteristiky pro plechy M-2 LITE CARLITE [10]



Obr. 16 Charakteristiky pro plechy TRAN-COR H [10]

Dostupné informace o jednotlivých řadách jsou uvedeny v tabulce 9. Z důvodu velkého množství nabízených typů jsou v tabulce uvedeny pouze rozmezí dodávaných plechů.

Tabulka 9 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy AK steel [10]

Typ	Tloušťka (mm)	Garantované ztráty (W/kg)				Průměrné ztráty (W/kg)			
		50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T
LITE CARLITE and MILL Anneal	0,18 - 0,35	0,67 - 1,1	1,05 - 1,56	0,87 - 1,45	1,34 - 1,99	0,64 - 0,97	0,98 - 1,35	0,82 - 1,28	1,25 - 1,77
Carlite	0,23 - 0,35	0,75 - 1,1	1,16 - 1,56	0,98 - 1,45	1,54 - 2	0,67 - 0,97	1 - 1,38	0,86 - 1,28	1,29 - 1,81
TRAN-COR H	0,23 - 0,3	0,6 - 0,77	0,8 - 1,05	0,8 - 1,03	1,06 - 1,4	0,56 - 0,74	0,77 - 0,99	0,75 - 0,98	1,01 - 1,31
TRAN-COR X	0,23 - 0,27	NA	0,75 - 0,85	NA	0,99 - 1,13	0,54 - 0,62	0,75 - 0,85	0,71 - 0,83	0,99 - 1,13

3.2.3 Thessenkrupp [11]

Německá firma, která se zabývá zpracováním oceli. Společnost nabízí dva typy orientované elektrotechnické oceli:

- **Powercore C** – Základní řada orientovaných ocelí.
- **Powercore H** – Vyšší řada orientovaných ocelí, které mají ostřejší krystalografickou strukturu než Powercore C. Vyznačující se nižšími magnetickými ztrátami než předchozí řada.

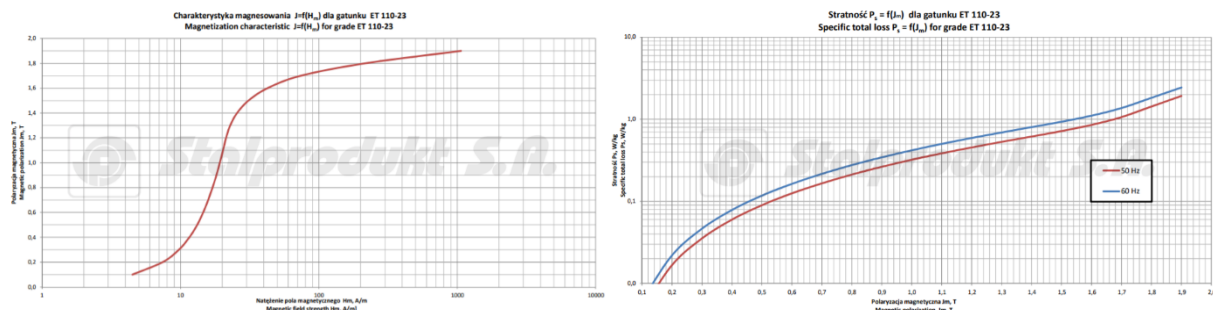
Tabulka 10 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Thessenkrupp

Typ	Tloušťka (mm)	Garantované ztráty (W/kg)				Průměrné ztráty (W/kg)			
		50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T
Powercore C	0,23 - 0,35	NA	1,2 - 1,65	NA	1,58 - 2,18	0,77 - 1	1,18 - 1,48	1,1 - 1,32	1,56 - 1,96
Powercore H	0,2 - 0,3	NA	0,7 - 1,1	NA	0,92 - 1,45	0,5 - 0,77	0,68 - 1,08	0,66 - 1,01	0,88 - 1,43

3.2.4 Stalprodukt S.A [7]

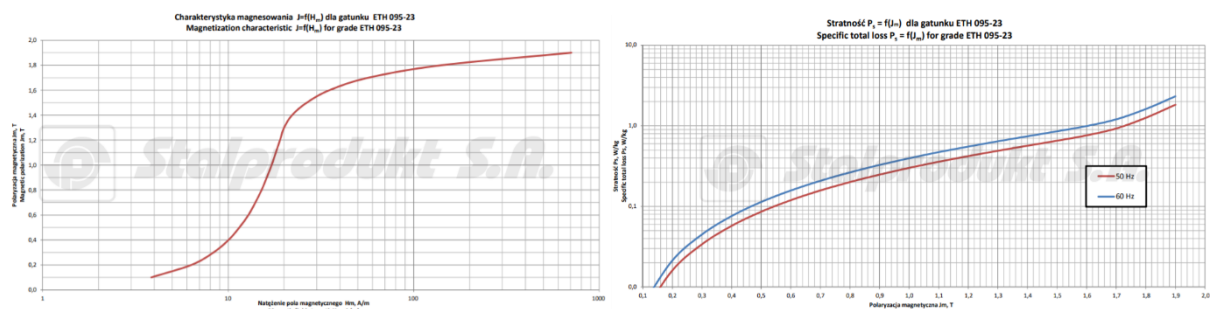
Polská společnost, která má v nabídce dvě řady elektrotechnických ocelí:

- **CGO** – Základní řada orientovaných elektrotechnických ocelí. I přesto, že je to jejich základní řada, obsahuje úpravu laserem pro získání nižších magnetických ztrát.



Obr. 17 Charakteristiky pro plechy CGO [7]

- **HGO** – Vyšší řada ocelí zaměřena na vyšší permeabilitu a nižší magnetické ztráty až o 0,3 W/kg.



Obr. 18 Charakteristiky pro plechy HGO [7]

V tabulce 11 jsou uvedeny magnetické vlastnosti dostupné z datasheetu.

Tabulka 11 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Stalprodukt S.A [7]

Typ	Tloušťka (mm)	Garantované ztráty (W/kg)				Průměrné ztráty (W/kg)			
		50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T
CGO	0,23 - 0,35	NA	1,1 - 1,4	NA	NA	0,73 - 0,97	1,07 - 1,34	0,95 - 1,23	1,37 - 1,77
CGO LS	0,23 - 0,3	NA	0,9 - 1,1	NA	NA	0,62 - 0,77	0,89 - 1,07	0,78 - 0,97	1,17 - 1,41
HGO	0,23 - 0,3	NA	0,95 - 1,05	NA	NA	0,63 - 0,75	0,93 - 1,04	0,79 - 0,95	1,23 - 1,38
HGO DR	0,23	NA	0,8 - 0,9	NA	NA	0,57 - 0,62	0,78 - 0,88	0,76 - 0,78	1,02 - 1,15

3.2.5 JFE steel corporation [12]

Japonská firma, která kromě orientované a neorientované oceli vyrábí také speciální ocel pro vysoké frekvence tzv Super Core. Orientované plechy nabízí společnost v několika variantách:

- **JG core** – Standartní orientované plechy

- **JGH core** – Vyšší řada orientovaných plechů s lepšími magnetickými vlastnostmi oproti předchozí řadě.
- **JGS** – Nejvyšší řada standartních orientovaných plechů.
- **JGSD** – Magnetické domény v těchto plechách jsou jemnější a rozděleny drážkami vytvořenými elektrolytickým leptáním. Jsou vhodné jak pro vinutá jádra, tak pro skládaná.
- **JGHE a JGSE** – Speciální elektrotechnické plechy určeny pro aplikace, kde je požadována vysoká účinnost.

Tabulka 12 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy JFE steel corporation [12]

Typ	Tloušťka (mm)	Garantované ztráty (W/kg)				Průměrné ztráty (W/kg)			
		50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
		1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T
JG core	0,23 - 0,35	NA	1,1 - 1,55	NA	1,45 - 2,04	0,7 - 1,02	1 - 1,47	0,93 - 1,34	1,3 - 1,92
JGH core	0,23 - 0,35	NA	0,9 - 1,35	NA	1,19 - 1,78	0,63 - 0,91	0,88 - 1,26	0,81 - 1,21	1,15 - 1,65
JGHE core	0,23	NA	0,8-0,85	NA	1,05 - 1,12	0,56 - 0,57	0,77 - 0,8	0,74 - 0,75	1,01 - 1,04
JGS core	0,23 - 0,35	NA	0,85 - 1,25	NA	1,12 - 1,65	0,61 - 0,91	0,83 - 1,2	0,8 - 1,2	1,09 - 1,6
JGSD core	0,23 - 0,27	NA	0,75 - 0,95	NA	0,99 - 1,25	0,53 - 0,65	0,72 - 0,88	0,71 - 0,85	0,95 - 1,16
JGSE core	0,23 - 0,27	NA	0,7 - 0,9	NA	0,91 - 1,19	0,5 - 0,63	0,68 - 0,84	0,66 - 0,84	0,89 - 1,12

3.2.6 Ostatní výrobci a dovozci

V tomto seznamu je uveden pouze malý vzorek výrobců orientovaných elektrotechnických plechů. Na českém trhu jsou největšími dodavateli:

- **Apex steel [13]** – Dle webových stránek jde o společnost, která obchoduje s ocelovými výrobky v mezinárodním měřítku. Hlavní centrálu pro výrobu orientovaných elektrotechnických plechů má v Ostravě. Společnost distribuuje jak celé ocelové role, tak hotová magnetická jádra. Bohužel se nepodařilo dohledat žádný datasheet nebo jiné informace o jejich výrobcích.
- **Therma FM [8]** – Společnost, která sídlí ve Frýdlantu nad Ostravicí nabízí kromě již hotových magnetických jader také prodej orientované elektrotechnické oceli. Dle dostupných údajů se však jedná o přeprodej elektrotechnických plechů od firmy Waasner.

Mnoho výrobců existuje zejména na asijském trhu. Jde o společnosti jako Shanghaimetal [14], Tochigi Seiko, Matson industry a mnoho dalších. Tyto společnosti často razí a dodávají elektrotechné plechy EI za nízké ceny, ale poskytují málo technických informací a jejich webové stránky se neprezentují příliš důvěrně. Velkou koncentrací těchto společností lze nalézt na stránce www.alibaba.com.

Srovnávací tabulku elektrotechnických plechů od jednotlivých výrobců je přiložena v příloze A.

Příloha A

Výrobce	Typ	Tloušťka (mm)	Garantované ztráty (W/kg)				Průměrné ztráty (W/kg)			
			50 Hz		60 Hz		50 Hz		60 Hz	
			1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T	1,5 T	1,7 T
Aksteel [10]	LITE CARLITE and MILL Anneal	0,18 - 0,35	0,67 - 1,1	1,05-1,56	0,87 - 1,45	1,34 - 1,99	0,64 - 0,97	0,98 - 1,35	0,82 - 1,28	1,25 - 1,77
	Carlite	0,23 - 0,35	0,75 - 1,1	1,16 - 1,56	0,98 - 1,45	1,54 - 2	0,67 - 0,97	1 - 1,38	0,86 - 1,28	1,29 - 1,81
	TRAN-COR H	0,23 - 0,3	0,6 - 0,77	0,8 - 1,05	0,8 - 1,03	1,06 - 1,4	0,56 - 0,74	0,77 - 0,99	0,75 - 0,98	1,01 - 1,31
	TRAN-COR X	0,23 - 0,27	NA	0,75 - 0,85	NA	0,99 - 1,13	0,54 - 0,62	0,75 - 0,85	0,71 - 0,83	0,99 - 1,13
Thyssenkrupp [11]	Powercore C	0,23 - 0,35	NA	1,2 - 1,65	NA	1,58 - 2,18	0,77 - 1	1,18 - 1,48	1,1 - 1,32	1,56 - 1,96
	Powercore H	0,2 - 0,3	NA	0,7 - 1,1	NA	0,92 - 1,45	0,5 - 0,77	0,68 - 1,08	0,66 - 1,01	0,88 - 1,43
Stalprodukt S.A [7]	CGO	0,23 - 0,35	NA	1,1 - 1,4	NA	NA	0,73 - 0,97	1,07 - 1,34	0,95 - 1,23	1,37 - 1,77
	CGO LS	0,23 - 0,3	NA	0,9 - 1,1	NA	NA	0,62 - 0,77	0,89 - 1,07	0,78 - 0,97	1,17 - 1,41
	HGO	0,23 - 0,3	NA	0,95 - 1,05	NA	NA	0,63 - 0,75	0,93 - 1,04	0,79 - 0,95	1,23 - 1,38
	HGO DR	0,23	NA	0,8 - 0,9	NA	NA	0,57 - 0,62	0,78 - 0,88	0,76 - 0,78	1,02 - 1,15
Shanghaimetal [14]	Conventional G type	0,23 - 0,35	NA	1,1 - 1,55	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	High induction P type	0,23 - 0,35	NA	0,85 - 1,35	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Domain refined high induction R type	0,23 - 0,27	NA	0,85 - 0,95	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Waasner [2]	EN 10027-1	0,23 - 0,35	0,8 - 1,11	1,27 - 1,65	NA	NA	NA	NA	NA	NA
JFE steel corporation [12]	JG core	0,23 - 0,35	NA	1,1 - 1,55	NA	1,45 - 2,04	0,7 - 1,02	1 - 1,47	0,93 - 1,34	1,3 - 1,92
	JGH core	0,23 - 0,35	NA	0,9 - 1,35	NA	1,19 - 1,78	0,63 - 0,91	0,88 - 1,26	0,81 - 1,21	1,15 - 1,65
	JGHE core	0,23	NA	0,8-0,85	NA	1,05 - 1,12	0,56 - 0,57	0,77 - 0,8	0,74 - 0,75	1,01 - 1,04
	JGS core	0,23 - 0,35	NA	0,85 - 1,25	NA	1,12 - 1,65	0,61 - 0,91	0,83 - 1,2	0,8 - 1,2	1,09 - 1,6
	JGSD core	0,23 - 0,27	NA	0,75 - 0,95	NA	0,99 - 1,25	0,53 - 0,65	0,72 - 0,88	0,71 - 0,85	0,95 - 1,16
	JGSE core	0,23 - 0,27	NA	0,7 - 0,9	NA	0,91 - 1,19	0,5 - 0,63	0,68 - 0,84	0,66 - 0,84	0,89 - 1,12

4 Volba vzduchové mezery

Velikostí vzduchové mezery lze efektivně ovlivnit celkovou reluktanci magnetického obvodu, a tím i jeho bod nasycení. Některé aplikace, hlavně ty, které využívají vysokou stejnosměrnou složku proudu, právě tuto vlastnost vyžadují. Je však třeba mít na paměti, že se zvětšováním délky vzduchové mezery zároveň klesá relativní permeabilita celého magnetického obvodu a tím i jeho indukčnost, což je třeba kompenzovat zvýšením počtu závitů, jak vychází z následující rovnice:

$$L = \frac{\mu_e N^2 S_j}{l_s}, \quad (4.1)$$

kde je využito:

N – počet závitů vinutí,

S_j – průřez jádra,

l_s – střední délka siločáry magnetického toku,

efektivní permeabilita:

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{l_v}{l_s} \mu_r}, \quad (4.2)$$

kde l_v odpovídá délce vzduchové mezery a μ_r relativní permeabilitě použité oceli.

Pro stanovení optimální délky vzduchové mezery, která bude maximálně vyhovovat jak z hlediska dostatečného nasycení, tak z požadavku na co nejmenší objem vinutí, lze využít následující metodu. Ta vychází z pozorování magnetické energie a sestává ze dvou hledisek [15]:

1. Hledisko omezeného magnetického napětí

Předpokládá, že většina úbytku magnetického napětí vytvořeného vinutím se nachází právě ve vzduchové mezeře. Pro energii magnetického obvodu

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{F_m^2}{R_m}, \quad (4.3)$$

kde F_m označuje magnetické napětí a R_m reluktanci magnetického obvodu.

Z toho poté plyne:

$$l_v = \frac{\frac{1}{2} \mu_0 F_m^2 S_j}{W_m} - \frac{l_s}{\mu_r}, \quad (4.4)$$

přičemž hodnota l_s lze zanedbat.

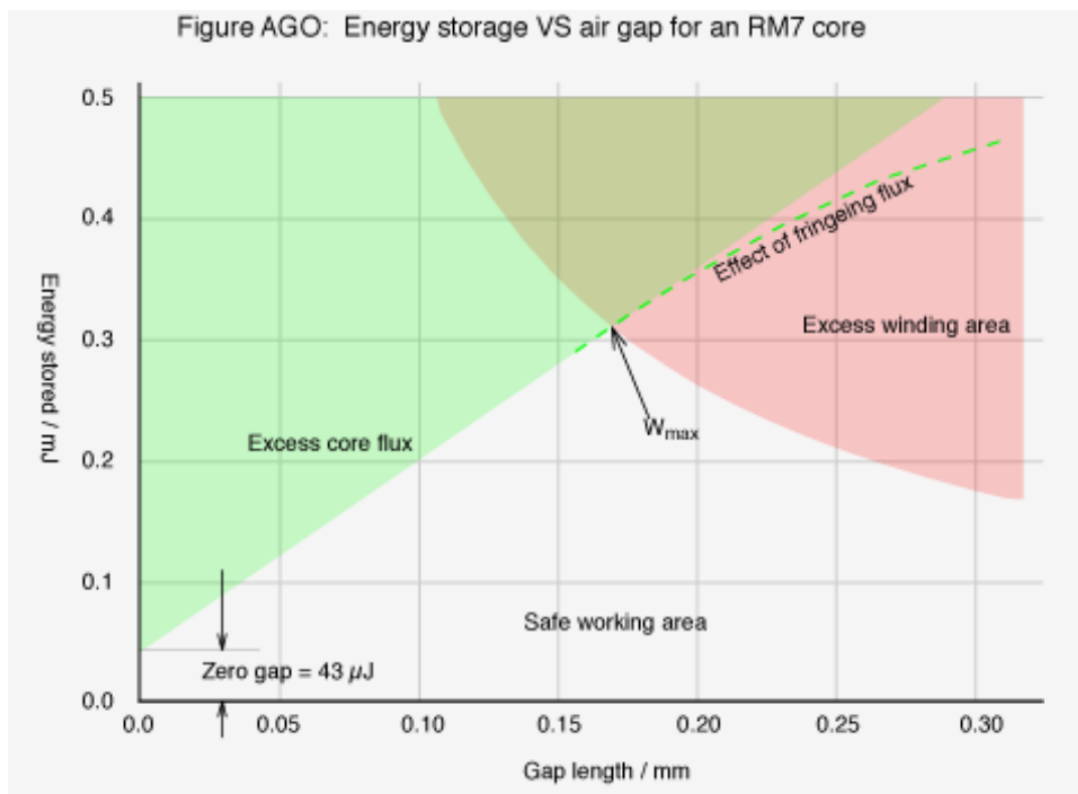
2. Hledisko omezené velikosti magnetického toku

$$W_m = \frac{1}{2} \Phi_{max}^2 R_m, \quad (4.5)$$

kdy Φ_{max} je nejvyšší hodnota magnetického toku, kterou je použitá ocel schopná pojmout.

$$l_v = \frac{2\mu_0 W_m}{B_{max}^2 S_j} - \frac{l_s}{\mu_r}, \quad (4.6)$$

Z popsaného postupu lze získat obdobu charakteristik zobrazených na Obr. 21.

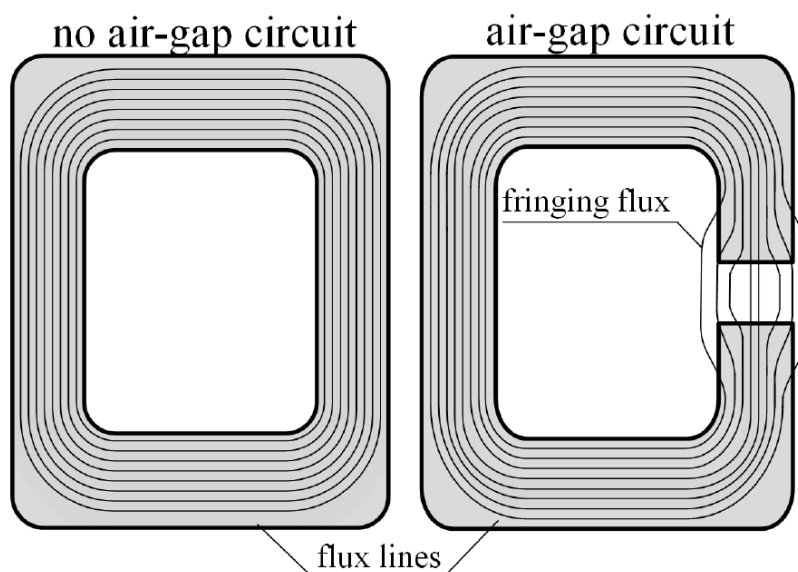


Obr. 21: Stanovení optimální velikosti vzduchové mezery (převzato z [15])

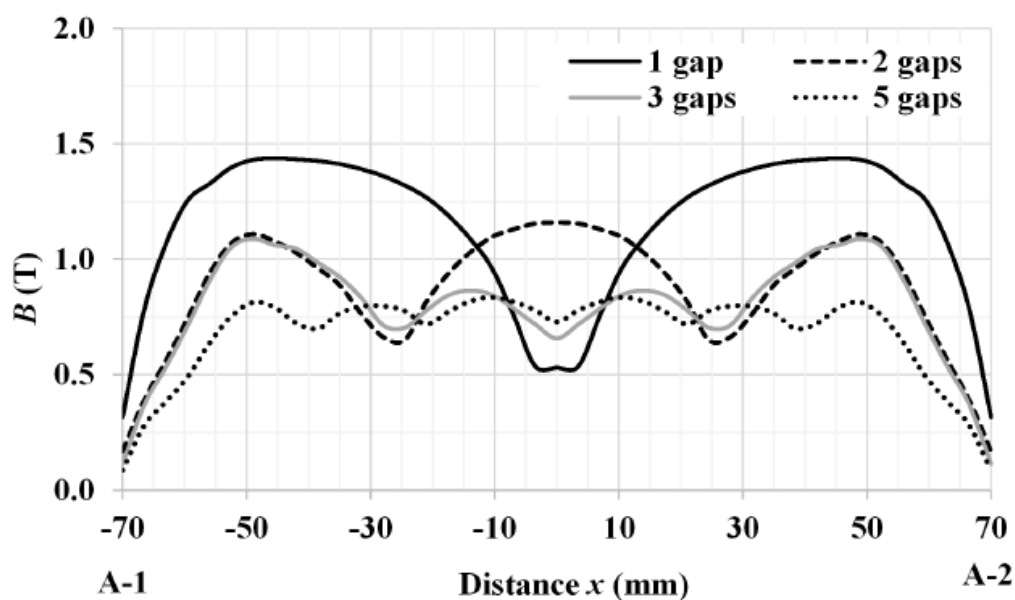
4.1 Dělená vzduchová mezera

Velká délka vzduchové mezery způsobuje značný odklon siločar magnetického toku vně průřez jádra, viz Obr. 22. Tento tok může poté interagovat s blízkými zařízeními a zvyšují se tak z pohledu EMC požadavky na celkové rozměry systému. Na Obr. 23 lze vidět porovnání rozložení magnetické indukce podél šířky vzduchové mezery pro několik různých počtů dílčích mezer při zachování celkové délky vzduchové části magnetického obvodu. Je patrné, že při snížení vybíhavé části magnetického toku se sníží efektivní průřez vzduchové mezery a vzroste tak její magnetický odpor, což vede na nižší indukčnost. Dělení vzduchové mezery má naopak pozitivní vliv na velikost ztrát v magnetickém obvodu, jelikož vede na rovnoměrnější rozložení magnetické indukce, její maximální hodnota klesá a tomu s druhou mocninou úměrně i ztráty, což lze pozorovat v tabulce č. 13. Další podstatná výhoda dělení je zvýšení velikosti proudu, při které dochází k nasycení magnetického obvodu, viz Obr. 24. Poslední zmíněná vlastnost se může prokázat jako velice přínosná v aplikacích, ve kterých se vyskytuje množství vyšších harmonických superponujících se na základní harmonickou a zvyšujících tak celkovou amplitudu proudu [16].

Tato problematika je blíže popsána v [17-20].



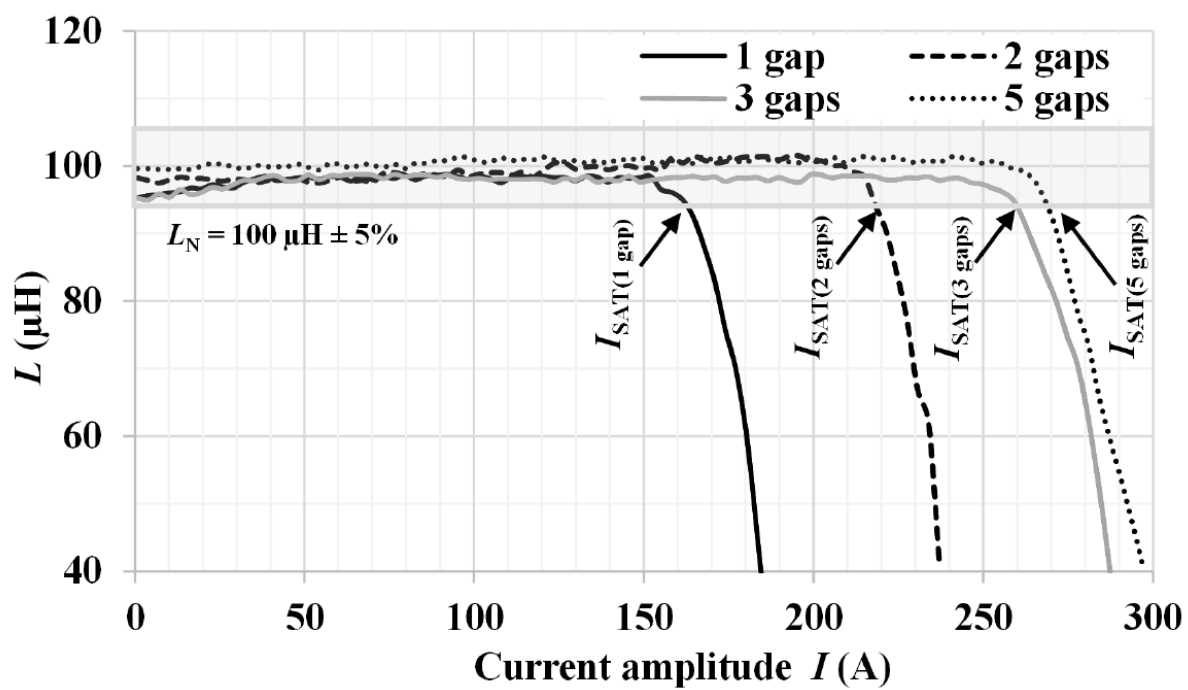
Obr. 22: Průběh siločar magnetického toku vně průřez jádra (převzato z [16])



Obr. 23: Rozložení částí magnetického toku vybíhající vně průřez jádra v oblasti vzduchové mezery (převzato z [16])

Tab. 13: Porovnání vlastností tlumivek při různých počtech vzduchových mezer (převzato z [16])

Parameter	Symbol	1 gap	2 gaps	3 gaps	5 gaps
number of turns	N	36	44	46	48
inductance of coil	L (μH)	98	103	98	96
resistance of coil	R ($\text{m}\Omega$)	3.4	4.3	4.5	4.7
power losses in windings	P_{CU} (W)	33.9	42.8	45.1	47.4
power losses in a core	P_{CR} (W)	1.1	1.3	1.0	0.6
total power losses	P_{T} (W)	35.0	44.1	46.1	48.0
saturation current	I_{SAT} (A)	163	218	262	268



Obr. 24: Závislost magnetické indukce na amplitudě elektrického proudu při různých počtech dělení vzduchové mezery (převzato z [16])

Literatura

- [1] <http://www.elektrov.cz/produkty/dekompenzacni-tlumivky-pro-kompensaci-kapacitnych-vykonu>
- [2] http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Katalog_Waasner_01_2020.pdf#page=7
- [3] https://www.czechtrafo.cz/jadra/vyvojove-trendy-magnetickeho-obvodu/?fbclid=IwAR1Pv_6RRhCkosQ8KX1PZvoQCuAJ1cSTlrH-K_0cwhn4nxS4EWJ7xNLsA1Q
- [4] <https://libertysteelgroup.com/cz/o-spolecnosti/zavody/liberty-technotron-s-r-o/produkty/delena-c-jadra-2/>
- [5] <http://thermafm.cz/upload/files/5a7ad213874d9/Katalog-CZ-2017-marketing.pdf>
- [6] <https://libertysteelgroup.com/cz/o-spolecnosti/zavody/liberty-technotron-s-r-o/produkty/unicore-jadra/>
- [7] <https://www.stalprodukt.com.pl/download/12,4,14,50,177>
- [8] <http://thermafm.cz/magneticke-obvody-z-elektrotechnicke-oceli/>
- [9] <https://www.aemcores.com.au/products/cores/>
- [10] <https://www.aksteel.com/our-products/electrical-steel/grain-oriented-electrical-steels>
- [11] <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/products/electrical-steel/electrical-steel-grain-oriented/electrical-steel-grain-oriented.html>
- [12] <https://www.jfe-steel.co.jp/en/products/electrical/catalog/f1e-001.pdf>
- [13] <https://www.aksteel.com/our-products/electrical-steel/grain-oriented-electrical-steels>
- [14] https://www.shanghaimetal.com/non_grain_oriented_silicon_steel_crngo_cold_rolled-438.htm?gclid=CjwKCAjwqvvyFBhB7EiwAER786Xq-Sxo0he-qcowQ8Y_K4RxBM99Gjul8Pc3_WhmhVra6FMqr5LyvIxoCDJEQAvD_BwE
- [15] R. Clarke, Air gapped magnetic cores.
"http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/gap/", 2011. [Online; navštíveno 17.6.2020].
- [16] R. Jez, "Influence of the Distributed Air Gap on the Parameters of an Industrial Inductor," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2017, Art no. 8401605, doi: 10.1109/TMAG.2017.2699120.
- [17] W. A. Roshen, "Fringing field formulas and winding loss due to an air gap," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 8, pp. 3387–3394, Aug. 2007.
- [18] N. H. Kutkut and D. M. Divan, "Optimal air-gap design in highfrequency foil windings," in *Proc. IEEE 12th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Atlanta, GA, USA, Feb. 1997, pp. 381–387.

4.2 *Doporučené zdroje*

- [19] C. W. T. McLyman, Transformer and Inductor Design Handbook. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2004, pp. 1.21–1.26.
- [20] M. K. Kazimierczuk, High-Frequency Magnetic Components. New York, NY, USA: Wiley, 2009.

Seznam obrázků

Obr. 1 Elektrotechnické plechy EI [2]	5
Obr. 2 Referenční tlumivka [1]	5
Tabulka 1 Parametry referenční tlumivky [1]	5
Tabulka 2 Rozměry referenčních plechů [2]	5
Tabulka 3 Dostupné mag. vlastnosti neorientovaných elektrotechnických plechů od firmy Waasner [2]	6
Obr. 3 Technologie skládání elektrotechnických plechů zleva: non step-lap, natupo, step lap [3]	7
Obr. 4 Průchod magnetického toku zleva: Non step-lap, step-lap [3]	7
Obr. 5 Vinutá třífázová magnetická jádra [4]	8
Tabulka 4 Dostupné magnetické vlastnosti vinutých jader od firmy Liberty Technotron s.r.o [4]	8
Obr. 6 Vinuté magnetické jádro od firmy Waasner [2]	9
Tabulka 5 Maximální a minimální rozměry skládaných mag. jader od firmy Waasner [2]	9
Obr. 7 Postup skládání UNICORE jader	9
Obr. 8 Jádro UNICORE DUO [6]	10
Obr. 9 Typy provedení UNICORE jader DUO [6]	10
Obr. 10 UNICORE BUTT [6]	11
Obr. 11 UNICORE step BUTT [6]	11
Obr. 12 UNICORE Combi step BUTT [6]	12
Obr. 13 UNICORE DGAP [6]	12
Tabulka 6 Srovnání magnetických ztrát vinutých jader a UNICORE jader [6]	12
Obr. 14 Dostupné úhly v rozích pro technologii UNICORE zleva: 45°, 30°, 90° [7]	13
Tabulka 7 Minimální rozměry UNICORE jader [6]	13
Obr. 15 Graf závislosti ztrát na magnetické indukci pro různé materiály od firmy Stalprodukt S.A [7]	13
14	
Obr. 16 B-H charakteristika žíhaných a nežíhaných jader UNICORE, vinutých jader (C-Cores) a skládaných EI jader [7]	14
Tabulka 8 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Waasner [2] ..	14
Obr. 17 Charakteristiky pro plechy M-2 LITE CARLITE [10]	15
Obr. 18 Charakteristiky pro plechy TRAN-COR H [10]	16
Tabulka 9 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy AK steel [10].	16
Tabulka 10 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Thessenkrupp	16
Obr. 19 Charakteristiky pro plechy CGO [7]	17
Obr. 20 Charakteristiky pro plechy HGO [7]	17
Tabulka 11 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy Stalprodukt S.A [7]	17
Tabulka 12 Mag. vlastnosti orientovaných elektrotechnických plechů od firmy JFE steel corporation [12]	18
Obr. 21: Stanovení optimální velikosti vzduchové mezery (převzato z [15])	21
Obr. 22: Průběh siločar magnetického toku vně průřez jádra (převzato z [16])	22
Obr. 23: Rozložení částí magnetického toku vybíhající vně průřez jádra v oblasti vzduchové mezery (převzato z [16])	22

Obr. 24: Závislost magnetické indukce na amplitudě elektrického proudu při různých počtech dělení vzduchové mezery (převzato z [16])	23
--	----

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno