

Klasika a nové materiály jader od firmy Magnetics

Ing. Tomáš Navrátil | Ryston Electronics s. r. o.

■ Úvod

V současnosti se induktivní součástky stávají klíčovou a současně nejproblémovější součástkou snad všech výkonových obvodů a zásadně ovlivňují jejich účinnost, kvalitu regulace, EMI vyzařování, rozměry a hmotnost. Základním kamenem každé induktivní součástky je jádro a jeho materiál. V době „zelených“ kampaní je jejich správný výběr a výpočet magnetického obvodu předpokladem úspěchu. To ovšem vyžaduje elektrotechnické vzdělání z teorie pole a materiálů a navíc zkušenosti.

Jedním z významných výrobců je firma Magnetics Inc. Při vývoji výkonových spínaných obvodů v Rystonu preferujeme právě prášková jádra od této firmy a rovněž je distribuujeme na náš trh. Důvodem jsou jejich výtečné vlastnosti a příznivé ceny, hlavně u materiálu Kool M μ . Magnetics pracuje na vývoji dalších slitin (AmoFlux, Xflux, Nano) a jejich aplikací a publikuje řadu katalogů a technických bulletinů, které osvětlují jejich výhody a usnadňují jejich použití.

Prášková jádra jsou na špičce vývoje jak metalurgie, tak tvorby vhodných magnetických obvodů. Jsou vyráběna lisováním za studena z práškových slitin s obsahem železa, molybdenu, niklu, hliníku a křemíku, jsou tedy RoHS (ferity se vyrábějí spékáním a železoprachová jádra se lisují s organickým pojivem). Vynikají svými magnetickými a dalšími užitnými vlastnostmi, zejména nízkými ztrátami v širokém rozsahu teplot a kmitočtů.

■ Kritické porovnání práškových jader s tradičními materiály

Prášková jádra se vyrábějí v toroidních tvarech o průměru 6 až 150 mm, nově i jako E, C, UI, planární jádra, tenké toroidy



„ThinZ“ a přesné „cihly“ a sady „oválů“ pro sestavování velkých tvarů, podobně jako ferity. Díky výrobní technologii mají rozloženu vzduchovou mezeru ve spárách mezi nanozrny slitiny s vysokou permeabilitou (alá permalloy), což je výhodné z důvodu velmi slabého rozptylového pole vně jádra.

Zajímavá je hodnota maximální indukce, která dosahuje podle materiálu až 2,5 tesla (u feritů je to 0,3 tesla), a tak umožňuje akumulovat vysokou energii v malém objemu jádra. Tím prášková jádra daleko převyšují běžná feritová jádra se vzduchovou mezerou i železoprachová jádra.

Prášková jádra našla využití jako výkonové indukty ve spínaných zdrojích a kompenzátorech účinníku (PFC) nebo jako transformátory v měničích typu flyback.

Tvary E umožňují navíjet i složité cívky s použitím kostříček a dodržet izolační bariéry. Jejich rozměry včetně cívek jsou ke stažení na stránkách výrobce. Toroidní tvar je vhodný hlavně pro indukty s jedním vinutím v jedné vrstvě, často bez kostry.

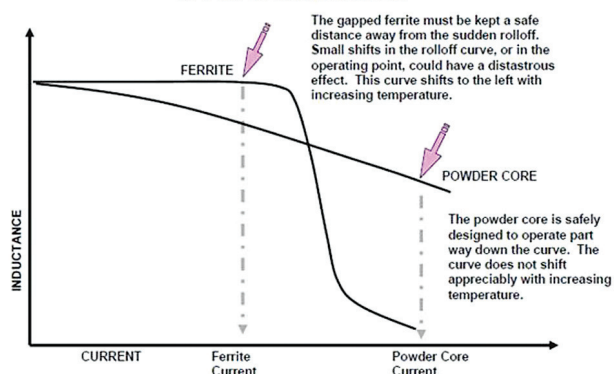
Firma Magnetics vyrábí v současnosti prášková jádra z různých materiálů; nejlepší, ale nejdražší jsou MPP (molybden-permalloy), HIF (High-flux), levný je KoolM μ , nové AmoFlux, Xflux, MAX a letošní novinky Edge a Nanocrystalline (viz dále). Nejlevnější, velmi kvalitní a v širokém sortimentu jsou však stále jádra z materiálu Kool M μ , kterým se budeme věnovat v následujícím textu.

Značení: Typové řady MPP, HIF, Kool M μ a Xflux se odlišují předčíslicí (55, 58, 77, 78, 79), materiálovými charakteristikami a hlavně cenou, avšak typy se stejným kmenovým trojčíslicím (viz *tabulka 2*) mají shodné rozměry a permeabilitu a další základní vlastnosti. Suffixy pak určují povrchovou úpravu, toleranci a souběh parametrů v dávce (binning).

Tabulka 1 Porovnání vlastností soudobých práškových materiálů, zvýrazněny ty nejlepší

Materiál (Prefix)	MPP 55	High Flux 58	Kool M μ 77	XFlux 78	KM μ Alloy 75	KM μ MAX, Edge
Permeabilita	14–300	14–160	14–125	26–60	26–60	26–60
Saturace (Bsat)	1,7 T	2,5 T	1,4 T	1,6 T	1,5 T	1,0 T
Max. teplota (°C)	200	200	200	200	200	200
Střední ztráty v magnetiku	Nejnižší	Střední	Nízké	Střední	Nízké	Velmi nízké
Sortiment tvarů	Toroidy	Toroidy	Toroidy, E, U, Bloky	Toroidy, E, Bloky	Toroidy	Toroidy
Ss magnetizace	Velmi dobrá	Nejlepší	Dobrá	Nejlepší	Velmi dobrá	Velmi dobrá
Složení slitiny a cena (Ni, Mo: drahé)	FeNiMo	FeNi	FeSiAl	FeSi	FeSiAl	FeSiAl/Ni

Soft Saturation



Obr. 1 ss nasycení u feritů a práškových materiálů (originál v angličtině)

Jádra Kool M μ mají příznivou cenu, srovnatelnou se současnými cenami feritových jader, a navíc podstatně nižší ztráty v materiálu než ferity se vzduchovou mezerou nebo železopracová jádra a nejširší sortiment tvarů. Další výhodou je poměrně vysoká tepelná vodivost, což umožňuje dobré chlazení jádra.

■ Stejnosemnná magnetizace

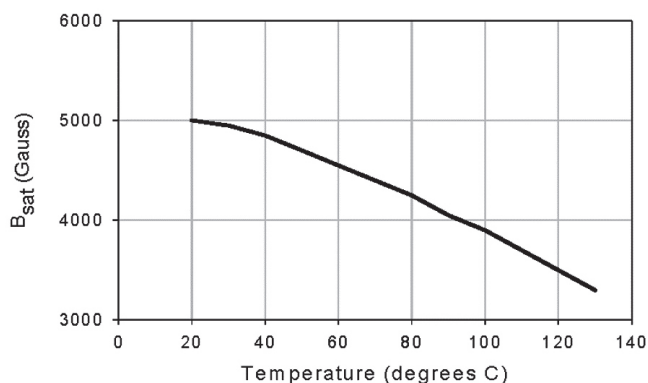
Jádra jsou dostupná v materiálových variantách s různými relativními permeabilitami (Kool M μ 14 až 125, MPP až 500). To určuje, spolu s tvarem jádra, charakteristický součinitel AL pro indukčnost z počtu závitů podle vztahu

$$L = A_L \times n^2, \text{ kde } n \text{ je počet závitů.}$$

Nejdůležitějším údajem magnetického materiálu ve výkonné aplikaci je však schopnost chovat se jako induktor, tedy mít permeabilitu i při superponované stejnosměrné magnetizaci čili za proudu. Tuto vlastnost popisuje dobře součin $(LI^2)_{\max}$, tedy maximální povolený součin indukčnosti a kvadrátu celkového proudu induktorem. V tomto porovnání vycházejí prášková jádra o několik řádů lépe, jak uvidíme dále. Toto číslo vlastně charakterizuje energii v magnetickém obvodu induktoru a významem odpovídá součinu $(BH)_{\max}$ – maximální hustotě energie v jádře. Zpravidla pokud nechceme mít cívku přesytku, musíme volit B při maximálním proudu daleko před nasycením ss magnetizací.

Obr. 1 porovnává situaci při nasycení – tedy závislost indukce na stejnosměrné magnetizaci – u feritů a práškových jader. Intenzita magnetického pole H je závislá na proudu. Rozložená vzduchová mezeru v jádru Kool M μ způsobuje hladkou funkci závislosti B-H, bez náhlého nasycení a skokového poklesu, jak je tomu u feritů. V řadě aplikací je povolna se měnící (klesající) indukčnost v závislosti na ss magnetizaci spíše žádoucí, neboť zlepšuje účinnost a umožňuje širší rozsah pracovních podmínek. I při požadavku na konstantní proud je měkká závislost indukčnosti na ss magnetizací výhodná, protože dovoluje krátkodobá přetížení, např. při přechodových dějích při zapnutí nebo náhodném zkratu.

Flux Density vs. Temperature (Power Ferrite)



Obr. 2 Pokles B_{sat} s teplotou u feritů (pozn.: převzato z originálu, 1000 Oe = 7,95 × 10⁴ A m⁻¹, 10000 Gaussů = 1 tesla)

■ Srovnání práškových jader s ferity s probroušenou mezerou

Jádra Kool M μ nabízejí vzhledem k desetinasobnému B_{max} podstatně lepší stejnosměrnou magnetizační charakteristiku než feritová jádra. Při obvykle voleném 50% poklesu indukčnosti v pracovním bodě vychází práškové jádro menší až o 35 %, a navíc je zde záruka robustnějšího chování díky pozvolnější saturaci materiálu, na rozdíl od ostré saturace feritů. Rozdíl je ještě výraznější při vyšších teplotách (nad 80 °C); zatímco ferity ztrácejí rychle magnetické vlastnosti díky Curieově teplotě kolem 100 °C, Kool M μ zůstává prakticky beze změny až k 350 °C.

I když ve srovnání s nejlepšími ferity má materiál Kool M μ poněkud větší ztráty, u feritů často není možno využít nejvyšší počáteční permeabilitu vzhledem k nasycení při velkých prouděch. Ferit s vysokou počáteční permeabilitou často musí mít velkou vzduchovou mezeru, což má za následek velké rozptylové ztráty.

Tento problém je často přehlížen při výběru vhodného materiálu. Jak je zmíněno dále, velká vzduchová mezeru způsobí vychýlení toku i mimo prostor mezery, kde protíná i vinutí, v němž vznikají vířivé proudy.

Feritová E-jádra s probroušeným středním sloupkem mají proti Kool M μ i některé přednosti. Především je možno probroušováním dosáhnout užší tolerance indukčnosti: probroušovaná jádra mají typickou toleranci indukčnosti ±3 %, zatímco lisovaná jádra Kool M μ mají zpravidla ±8 %.

Dále jsou feritová jádra dostupná v daleko širším sortimentu tvarů, velikostí, od řady výrobců. Ferity jsou vhodnější pro aplikace s malou ss magnetizací vzhledem k vyšší efektivní permeabilitě při malých mezerách. Je to např. u dvojčinných transformátorů nebo induktorů bez ss proudu či proudově kompenzovaných induktorů.

■ Vlastnosti práškových jader při extrémních teplotách

Jelikož materiál Kool M μ má Curieovu teplotu kolem 500 °C, je použitelný v celém rozsahu teplot od -65 °C až do +200 °C, což

	MPP	High Flux	Kool M μ Toroid	Kool M μ E-core
Part Number	55868-A2	58867-A2	77868-A7	K5528E040
Permeability	26	60	26	40
Core Dim (in)	3.108 x .545	3.108 x .545	3.108 x .545	2.19 x 2.20 x .81
A _L (nH/turn)	30	68	30	157
Turns	62	45	70	30
Wire Fill Factor	24%	18%	27%	72%
Wound Dim (in)	3.657 x .884	3.514 x .884	3.720 x 1.053	2.19 x 2.20 x 1.98
Core Loss (mW)	116	230	182	290
Wire Loss (mW)	14,371	9,780	16,959	5,489
Total Loss (mW)	14,487	10,010	17,141	5,779
Temp Rise (°C)	35.3	27.4	37.7	22.4

Obr. 3 Porovnání induktorů stejné hmotnosti z různých práškových materiálů. Porovnejte ztráty.

je s rezervou vojenský/kosmický rozsah pracovních teplot. V celém tomto rozsahu jsou magnetické vlastnosti stabilní s mírným maximem okolo +40 °C. Na rozdíl od železoprachových jader jsou jádra Kool M μ vyráběna bez použití organického pojiva. Proto jádra Kool M μ netrpí degradací a stárnutím či křehnutím typickým pro železoprachová jádra.

Kool M μ nemá vyšší ztráty a zhoršování v^f vlastností při rostoucích teplotách, což je nepříznivá vlastnost feritů. Stejně tak, Kool M μ netrpí výrazným poklesem maximální indukce při vysokých teplotách, která nedovoluje feritům pracovat za všech podmínek s velkými stejnosměrnými proudy.

■ Rozptylový tok

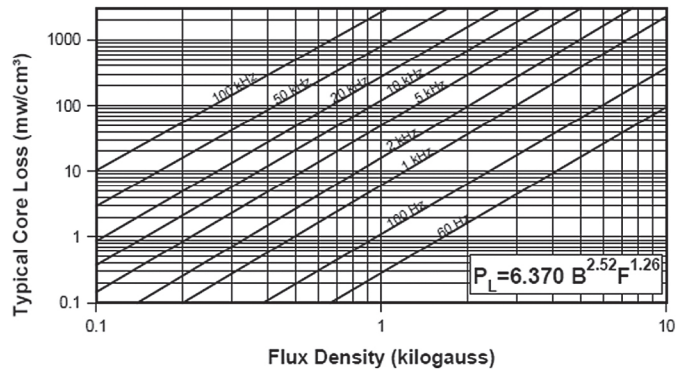
Jestliže část magnetického toku prochází prostorem mimo magnetikum, dojde k rozptylu pole. Všechny magnetické součástky mají nějaký rozptyl, přičemž platí, že magnetika s menší relativní permeabilitou (větším magnetickým odporem) mají větší rozptyl.

Feritová jádra s vysokou permeabilitou se často probušují, aby se díky vzduchové mezeře zabránilo nasycení jádra a snížila se efektivní permeabilita na žádanou hodnotu. Zpravidla se používá jedna poměrně velká mezeře ve středním sloupku. Siločáry tak mají velkou vzdálenost na překonání mimo magneticky vodivý materiál, a proto je rozptylový tok rozložen v poměrně velkém okolí vzduchové mezery a zasahuje až do vinutí. Probroušením se sice sníží výsledná permeabilita, ale akumulovaná energie v jádře je stále zhruba stejná.

Na rozdíl od toho Kool M μ má „rozloženou“ mezeře tvořenou póry mezi slisovanými zrny magnetika. Rozptylový tok v každém místě rozložené mezery má krátkou cestu zpět do magnetika, a proto se tak nešíří do okolí jádra. Výsledkem jsou nižší ztráty vířivými proudy ve vinutí.

Rozptylový tok poněkud zvětšuje efektivní průřez A_e a zmenšuje střední délku siločáry L_s jádra. Proto je na jádře s nižší permeabilitou naměřená indukčnost obvykle vyšší než spočítaná.

Rozptyl je také ovlivněn rozměry a tvarem jádra. Empiricky ověřeno, obecně u E jádra platí, že jádro s větší délkou závitu bude mít větší rozptyl než jádro s kratší délkou závitu. Rovněž platí, že jádro s objemnějším vinutím bude mít větší rozptyl než



Obr. 4 Graf ztrát v magnetiku při různých kmitočtech pro materiál HiFlux, kde je závislost nejmarkantnější

menší vinutí. K těmto poznatkům bylo přihlédnuto při tvorbě nomogramu pro výběr nevhodnějšího jádra.

■ Kool M μ versus železoprachová jádra (Iron Powder) – střídavé vlastnosti

Materiál Kool M μ (kompozice Al, Si, Fe) má velmi podobné stejnosměrné magnetizační charakteristiky jako železoprachová jádra (kompozice čistého železa). Výhoda materiálu Kool M μ spočívá v podstatně nižších v^f ztrátách v jádře a tím ve vyšších použitelných kmitočtech.

Výkonový induktor (s proudem) spínaného regulátoru „vidí“ stejnosměrný proud a na něm superponovanou střídavou složku. Typická frekvence je v rozsahu 10 kHz až 3 MHz. Tato střídavá složka proudu generuje střídavé magnetické pole, které vytváří v jádře ztráty vířivými proudy (vodivostí) a hysterezí (smýčky B-H), a jádro se proto zahřívá. Jak ukazuje obr. 4, i práškový materiál (HiFlux) má ztráty závislé na kmitočtu. Proto je volba materiálu kompromisem mezi požadavky na ss střídavé vlastnosti (a také cenu).

Kool M μ má oproti železoprachu mnohem nižší ztráty díky nanozrnům a velmi malé hysterezi. Dále má Kool M μ téměř nulovou magnetostrikci, což eliminuje slyšitelné akustické rušení typické pro železoprachová jádra (ale rovněž ferity a lamináty Si-Fe) při provozu v oblasti 20 Hz až 20 kHz.

■ Vnější rozptylové pole a tvar jádra

Tvar jádra ovlivňuje vnější rozptylové pole. Jádro tvaru E, kde většina vinutí je skryta v jádře, má větší vnější rozptylové pole než například toroidní tvar, kde naopak vinutí ukrývá jádro. Proto u EE sestav i z materiálu Kool M μ by mělo být vnější rozptylové pole uvažováno.

Jedním důsledkem je, že E-jádra Kool M μ se nesmějí stahovat kovovými svorníky (běžné u feritů), protože rozptylový tok by se soustřeďoval v těchto částech a zvětšoval ztráty. Dalším důsledkem je, že při použití součástek s E-jádrem Kool M μ musí být pečlivě navržen plošný spoj a součástky citlivé na rozptylové pole mají být umístěny daleko od jádra, podobně jako je tomu u feritů se vzduchovou mezerou.

■ Montážní prvky

Pro každou velikost Kool M μ E-jádra (2 kusy na sadu) je od výrobce k dispozici svislá kostička pro pájenou montáž do plošného spoje či bezvývodová.

Typy jsou uvedeny v *tabulce 2*, detaily jsou v katalogu Magnetics Kool M μ E-Cores, který je možno stáhnout z webu www.mag-inc.com. Jelikož jádra jsou vyráběna ve standardních velikostech, je možno použít i standardní kostry různých výrobců.

Jádro E, složené ze dvou polovin, může být také sestaveno slepením styčných ploch vhodným lepidlem a ovinutím sestavy fixační páskou. Sestavená cívka nebo transformátor se k plošnému spoji může i přilepit, díky nízkému rozptylu pole nehrozí vzájemné ovlivnění např. nalitou mědí na DPS.

V budoucnu bude sortiment E-jader Kool M μ dále rozšiřován. Montážní materiál pro všechny nové typy bude rovněž k dispozici. Informace můžete získat na dále uvedených stránkách firmy Magnetics nebo u jejích distributorů.

■ Volba jádra

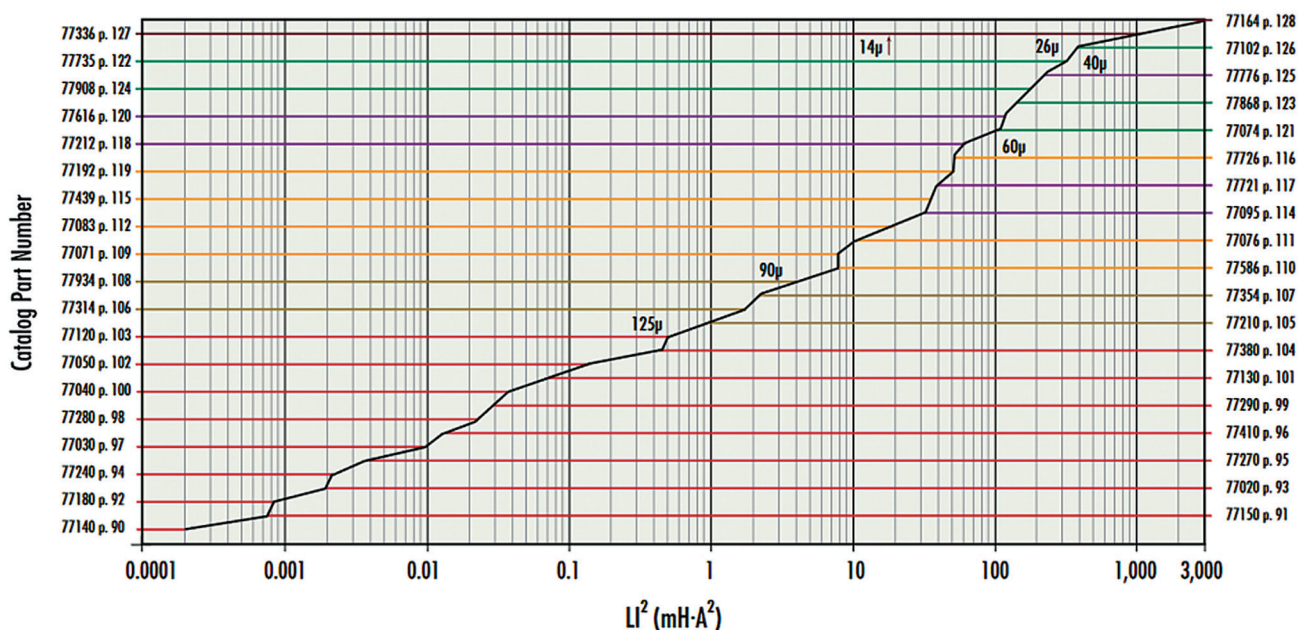
Na odkazu [1] najdete úplný postup pro výběr optimální permeability a nejmenšího použitelného jádra pro aplikace se stejnosměrnou složkou.

V tomto článku uvádíme rychlý návod pro zbežnou orientaci a volbu jádra ve formě nomogramu. Ten vychází z pravidla, že při daném max. ss proudě smí permeabilita poklesnout o maximálně 50 %, z odhadu činitele plnění vinutí 50 až 80 % průřezu jádra/kostry a z předpokladu, že střídavá složka je relativně malá vůči stejnosměrné složce. Dále je uvažován požadavek minimální tolerance indukčnosti při zvolené velikosti a permeabilitě jádra. Jestliže střídavá složka je relativně velká, jako je tomu například u flyback induktorů, doporučuje se zvolit o jednu hodnotu větší velikost jádra, než jaká vyjde z grafu. Tím se sníží střídavá složka indukce v jádře a doprovodné nepříznivé efekty, zejména ztráty.

■ Kuchařka pro výběr jádra do Vaší aplikace a výpočet cívky

Musíte znát pouze dva výchozí parametry: požadovanou indukčnost při stejnosměrné složce a maximální hodnotu proudu včetně ss složky a zvlnění. Dále použijte uvedený návod pro určení velikosti jádra a počtu závitů.

1. Vypočítejte součin LI^2 , kde: L = žádaná indukčnost při ss složce [mH], I = stejnosměrný proud [A]. Fyzikální rozměr tohoto součinu je mJ a význam je zhruba energie akumulovaná v jádře. Proto je hmotnost jádra zhruba úměrná tomuto součinu.
2. Na vodorovné ose nomogramu najděte číslo LI^2 . Vyneste svislou přímkou a najděte průsečík s grafem a najděte první velikost jádra ležící nad průsečíkem. Menší velikosti jsou dole, větší nahoře. To je nejmenší použitelná velikost jádra zvoleného materiálu.
3. Graf je rozdělen do sekcí podle standardních permeabilit. Doporučuje se zvolit hodnotu permeability ze sekce, do níž padl průsečík. Je možno použít vyšší i nižší hodnotu permeability, avšak výsledné jádro vyjde zpravidla větší.
 - 3a) Zvolte „populární“ typ jádra pro snadnou dostupnost, např. *podle tabulky 2*.
4. Indukčnost, velikost jádra a permeabilita jsou nyní určeny. Nyní vypočtete počet závitů za použití následujícího postupu:
 - 4a) Ze jmenovité indukčnosti L a katalogové hodnoty A_L příslušného jádra určete počet závitů N (A_L je v jednotkách mH / 1000 závitů na druhou, což je totéž jako nH/N²). Určete nejmenší jmenovitou indukčnost s použitím nejhoršího možného případu negativní odchylky (–8 %). S touto informací vypočítejte počet závitů v mH pomocí vzorce: $N = (L \times 10^6 / A_L)^{1/2}$.
 - 4b) Vypočítejte ss intenzitu magnetického pole H_{dc} . Pro použití amerických grafů počítejte v oerstedech: $H_{dc} = 0,4 \pi \times NI / L_s$ (L_s je střední délka siločáry v cm.)



- 4c) Z grafů závislosti Permeability vs. DC Bias určete pokles počáteční permeability pro dříve spočítanou ss magnetizaci.
- 4d) Příslušně zvětšete počet závitů tak, že vydělíte původní počet závitů (krok 4a) číslem blízkým poklesu počáteční permeability (krok 4c). Tak by se měla zvýšit indukčnost na hodnotu blízkou žádané indukčnosti. Kroky a) až d) je možno opakovat anebo zaokrouhlovat na celé závity.
5. Z tabulky drátů podle žádaného proudu pro zvolené oteplení vyberte správný průřez, z toho vyjde průměr drátu. Nezapomeňte, že menší střída proudu dovolí použití tenčí drát, ale ne menší jádro.
6. Kontrola: Zvolené jádro by mělo mít indukčnost stejnou nebo vyšší než je žádaná při zadaném ss proudu. Vinutí by mělo zaplnit přibližně 70 % plochy kostry.

Tabulka 2 uvádí geometrie a magnetické vlastnosti nejběžnějších práškových jader ve formátu 77xxx.

■ Nanokrystalická jádra

Nanokrystalická jádra jsou letošní novinka z vývoje a jsou výbornou volbou pro konstrukci proudově kompenzovaných tlumičů (CMC), jelikož se vyznačují vysokou permeabilitou, nízkými výkonovými ztrátami a vysokou hodnotou saturace. Induktory z nanokrystalickými jádry se zdají být tou správnou volbou při výrobě spínaných zdrojů (SMPS), zálohovaných napáječů (UPS), solárních měničů a střídačů, frekvenčních převodníků, EMC filtrů, nabíjecích systémů pro EV i klasické automobily, svářeček a dalších výkonových aplikací. V porovnání s feritovými jádry nanokrystalická jádra vynikají širokým rozsahem provozních teplot a vyšší impedancí při vysokých kmitočtech.

Tabulka 2 Přehled geometrií a magnetických vlastností toroidních běžných práškových jader, s odkazy

Kmen. trojčíslí	A_L nH/z ²		L_e Délka siloč. mm	A_e s Průřez jádra mm ²	V_e Objem mm ³	D max mm	d min mm	ht max mm
	26 μ	60 μ						
050	12	27	31,2	11,7	365	13,5	6,99	5,51
120	15	35	41,2	19,56	806	17,3	9,53	7,11
380	19	43	41,4	23,2	960	18	9,02	7,11
206	14	32	50,9	23,47	1,194	21,1	12,1	7,11
310	19	43	56,7	32,85	1,863	23,6	13,3	8,4
350	22	51	58,8	38,8	2,281	24,3	13,8	9,7
930	32	75	65,4	66,1	4,322	27,7	14,1	11,9
548	28	61	81,4	67,7	5,509	33,7	19,5	11,4
585	16	38	89,5	47,1	4,215	35,2	22,6	9,8
324	24	56	89,8	68,3	6,136	36,7	21,5	11,4
254	35	81	98,4	110,6	10,880	40,8	23,3	15,4

Tabulka 3 Přehled dostupných typů a hlavních vlastností nanokrystalických jader

Objednací číslo	Průřez jádra cm ²	Délka siločáry cm	Holé OD mm	Holé ID mm	Holé HT mm	Zalité OD (max) mm	Zalité ID (min) mm	Zalité HT (max) mm
CMC016010006H	0,15	4,10	16,0	10,0	6,0	17,8	8,2	7,9
CMC020012008H	0,27	5,02	20,0	12,0	8,0	22,6	10,6	10,0
CMC025016010H	0,37	6,43	25,0	16,0	10,0	27,5	13,8	12,6
CMC030020010H	0,41	7,85	30,0	20,0	10,0	33,0	17,6	13,2
CMC030020012H	0,49	7,90	30,0	20,0	12,0	34,0	18,0	15,2
CMC030020015H	0,63	7,90	30,0	20,0	15,0	33,6	17,7	17,8
CMC040025015H	0,92	10,20	40,0	25,0	15,0	44,2	21,6	18,9
CMC040032015H	0,50	11,30	40,0	32,0	15,0	45,5	28,5	18,8

Základní charakteristika

- Složení: Slitina Fe•Si•Nb•Cu•B
- Tvary: Toroidy plné nebo s výřezy, řezaná jádra (C)
- Velikosti: 5–145 mm
- Maximální magnetická indukce: 1,25 tesla
- Barevné značení: modrá, zelená

Díky vysoké permeabilitě materiálu nanokrystalických jader lze očekávat menší rozměry a hmotnost CMC tlumivek, proudových transformátorů (CT) a magnetických zesilovačů (MagAmps) při stejných nebo vyšších proudtech než u feritů. Saturace je při 1,25 T a díky širšímu teplotnímu rozsahu jsou CMC tlumivky s těmito jádry méně náchylné na proudovou nesymetrii a ohřev než s ferity. Nižší střídavé ztráty zlepšují celkovou účinnost a umožňují zvýšenou izolaci moderními plastovými materiály jako polyester (<130 °C) a rynite (DuPont) polyester (<155 °C), což umožňuje použití tlustších a kratších vodičů při vinutí.

Aplikace:

- AC (sinusový) proudový transformátor
- Fázově řízený proudový transformátor
- Proudový transformátor imunní proti ss složce
- Hall Effect Sensor s jádrem se vzduchovou mezerou

Pro asistenci s volbou jádra pro vaši aplikaci můžete kontaktovat přímo firmu Magnetics [2].

Detaily vlastností materiálů a relace Impedance vs. Frequency, Permeability vs. Temperature, a B-H jsou ke stažení na odkazu [3] Nanocrystalline Material Property Curves.

Rovněž můžete navštívit webové stránky společnosti Ryston pro know-how [4] v češtině.

■ Závěr

Návrh induktoru není žádná magie, ale věda a zkušenost a samozřejmě trochu umění. Uvedený návod je prakticky použitelný. Pokud Vám nestačí katalogový induktor od standardního dodavatele, zkuste si cívku navrhnout sami, ale nezapomeňte si ji prakticky ověřit. Vzorky práškových jader i skladové položky najdete i na webu www.ryston.cz.

Odkazy:

- [1] <https://www.mag-inc.com/Design/Design-Guides/Inductor-Design-with-Magnetics-Powder-Cores>
- [2] <https://www.mag-inc.com/Company/Contact-Magnetics>
- [3] <https://www.mag-inc.com/Products/Tape-Wound-Cores/Nanocrystalline/Nanocrystalline-Material-Property-Curves>
- [4] <https://www.ryston.cz/o-nas/know-how>
- [5] *Electronic Design Magazine*, www.electronic-design.com
- [6] *Bodo's Power Systems Magazine*, www.bodospower.com
- [7] *Materiály firmy Magnetics*, www.mag-inc.com

180 x 115 mm