

Осердя з порошкових матеріалів

Артем Терейковський, директор, ТОВ «НВП АСТЕРА»

E-mail: ferrite@ukr.net

УТОЧНЕННЯ

Методи, що використовуються під час виробництва порошкових осердь, докладно описані у відкритій академічній і патентній літературі. Незважаючи на доступність інформації, в умовах

жорсткої конкуренції виробники осердь з МПМ прагнуть зберігати в таємниці особливості застосовуваних ними технологій і параметрів вихідної сировини. Попередні дані про параметри нових матеріалів і осердь з них, які публікують виробники, швидко втрачають актуальність. Унаслідок відсутності уточнень, до таблиць № 6–10 (CHIP NEWS, № 4, 2024) потрапила частково неповна і не-

коректна інформація. Тому для зручності читачів таблиці 6–10 надано повторно з поясненням змін і повною та достовірною інформацією на момент виходу поточного номера журналу.

Застаріла версія матеріалу Hi-Flux™ компанії Micrometals отримала назву Legacy Hi-Flux™, осердя з якого, як і раніше, доступні зі складу виробника. Нова версія називається Hi-Flux™, при

* Продовження. Початок див. CHIP NEWS, № 5, 2023, № 1–4, 2024.

Таблиця 6. Основні параметри МПМ зі сплаву Fe-Si-Al

Назва матеріалу або торговельна марка	Приклад маркування осердя 26.9 x 14.7 x 11.2 мм, $\mu = 60$	Виробник	Проникність	Зовнішній діаметр кільцевих осердь (без покриття), мм	ДСВ за 100 Ерстед (для $\mu = 60$)	Втрати за 50 кГц, 0.1 Т, мВт/см ³ (для $\mu = 60$)	Vs, Т
Sendust	MS-106060-2	Micrometals	14...160	3.56...197	49.2%	325	0.90
Sendust HF	SH-106060-2	Micrometals	26, 60, 125	3.56...197	43.6%	320	0.88
SenMax	SM-106060-2	Micrometals	26, 60	3.56...197	63.3%	226	1.035
SenMax Premium™	SP-106060-2	Micrometals	14...90	3.56...197	56.2%	187	0.9
KoolMu®	77894-A7	Magnetics	14...125	3.56...165	45%	190	1.0
KoolMu® Max	79894-A7	Magnetics	14...90	12.7...165	55%	200	1.0
Kool Mu® Hf	76894-A7	Magnetics	26, 40, 60	12.7...132	57%	140	1.0
KoolMu® Ultra	70894-A7	Magnetics	26, 40, 60	12.7...132	59%	100	1.0
Sendust	CS270060G	ChangSung	26...125	3.56...165	49%	280	1.0
HP	HP270060G	ChangSung	19, 26, 60	9.6...165	52.8%	110	0.85
New HP	Немає даних	ChangSung	60	Немає даних	55.2%	90	Немає даних
Sendust	KS106060A	KDM	26...125	12.7...165	47%	280	1.05
SuperSendust	KS106060A-HF	KDM	19...125	12.7...165	60%	300	1.3
SuperSendust Plus	KPH106060A	KDM	26...75	12.7...102	60%	230	1.2
SuperSendust Platinum	KPH106060A-HP	KDM	60	12.7...102	66%	150	1.2
Sendust	AS270060	ACME	26...147	6.35...77	48%	350	1.0
SuperDust AG	AG270060	ACME	26...90	12.7...77	60%	250	1.2
SuperDust AG-GT	AG270060GT	ACME	58	12.7...77	55%	120	1.2

Таблиця 7. Основні параметри МПМ зі сплаву Fe-Si

Назва матеріалу або торговельна марка	Приклад маркування осердя 26.9 x 14.7 x 11.2 мм, $\mu = 60$	Виробник	Проникність	Зовнішній діаметр кільцевих осердь (без покриття), мм	ДСВ за 100 Ерстед (для $\mu = 60$)	Втрати за 50 кГц, 0.1 Т, мВт/см ³ (для $\mu = 60$)	Vs, Т
FluxSan™	FS-106060-2	Micrometals	14...125*	3.56...197	76.5%	676	1.65
New FluxSan™	FX-106060-2	Micrometals	14...90	3.56...132	80%	480	1.82
X-Flux®	78894-A7	Magnetics	19...125	12.7...165	80%	575	1.6
X-Flux® Ultra	74894-A7	Magnetics	26, 60	12.7...132	84%	450	1.6
High DC Bias X-Flux®	74894-A7-S01	Magnetics	26, 40, 60	12.7...132	87%	625	1.6
MegaFlux	CK270060G	ChangSung	19...90	3.56...165	76.7%	590	1.6
MegaFlux GT	CK270060GT	ChangSung	60	9.6...165	78.5%	500	1.6
Fe-Si	KSF106060A	KDM	19...90	12.7...165	72%	590	1.6
Fe-Si Platinum	KSF106060A-HP	KDM	19...75	12.7...57.2	74%	380	1.5
Fe-Si low cost	KW106060A	KDM	26...90	22.9...165	60%	510	1.4
XFlux AK	AK270060	ACME	26...90	12.7...77	70%	600	1.5

* Під замовлення виробляються осердя з проникністю 160.

Таблиця 8. Основні параметри МПМ зі сплаву Fe-Ni

Назва матеріалу або торговельна марка	Приклад маркування осердя 26.9 x 14.7 x 11.2 мм, $\mu = 60$	Виробник	Проникність	Зовнішній діаметр кільцевих осердь (без покриття), мм	ДСВ за 100 Ерстед (для $\mu = 60$)	Втрати за 50 кГц, 0.1 Т, мВт/см ² (для $\mu = 60$)	Вс, Т
Legacy Hi-Flux™	HF-106060-2	Micrometals	14...160	3.56...165	68.6%	650	1.42
Hi-Flux™	HF-106060-2	Micrometals	14...125	3.56...165	80%	300	1.48
GX Alloy	GX-106060-2	Micrometals	60, 125	22...46,7	85%	229	1.7
High Flux	58894-A2	Magnetics	14...160	3.56...165	80.3%	252	1.5
Edge®	59894-A2	Magnetics	14...125	12.7...132	90%	150	1.5
High DC Bias Edge®	59894-A2-S01	Magnetics	26, 60	12.7...132	96%	200	1.5
HighFlux	CH270060	ChangSung	26...160	9.6...165	80.4%	180	1.5
HighFlux GT	CH270060GT	ChangSung	60	9.6...74	84.4%	130	1.5
High Flux	KN106060A	KDM	26...125	12.7...165	80%	220	1.5
High Flux Plus	KN106060A-H	KDM	60, 75	12.7...102	85%	150	1.5
High Flux Platinum	KN106060A-HP	KDM	26, 60	12.7...57.2	82%	105	1.5
HighFlux	AH270060	ACME	26...160	6.35...77	80%	300	1.5

Таблиця 9. Основні параметри композитних матеріалів на основі Fe-Ni, Fe-Si і та Fe-Si-Al

Назва матеріалу або торговельна марка	Приклад маркування осердя 26.9 x 14.7 x 11.2 мм, $\mu = 60$	Виробник	Композиція	Проникність	Зовнішній діаметр кільцевих осердь (без покриття), мм	ДСВ за 100 Ерстед (для $\mu = 60$)	Втрати за 50 кГц, 0.1 Т, мВт/см ² (для $\mu = 60$)	Вс, Т
Optilloy™ OP*	OP-106060-2	Micrometals	Fe-Ni, Fe-Si, Fe-Si-Al	14...125	6.35...154	64.7%	365	1.4
Optilloy™ OC	OC-106060-2	Micrometals	Fe-Ni@Fe-Si-Al	14...125	3.56...196	72.3%	265	1.35
Optilloy™ OD	OD-106060-2	Micrometals	Fe-Ni@Fe-Si	14...90	3.56...196	83.9%	450	1.55
Optilloy™ OE	OE-106060-2	Micrometals	Fe-Si-Al, Fe-Si, Fe-Ni	14...90	3.56...196	69.2%	460	1.2
75 Alloy	75894-A7	Magnetics	Fe-Si@Fe-Si-Al	26, 40, 60	24...134	56%	550	1.5
FineFlux	CF270060G	ChangSung	Fe-Si-Al@Fe-Si	26, 40, 60	9.6...165	60%	240	1.2
KS	KS270060G	ChangSung	Fe-Si@Fe-Si-Al	26...60	9.6...165	61%	480	1.4
HS	HS270060G	ChangSung	Fe-Ni@Fe-Si-Al	19, 26, 40, 60, 90	9.6...165	72%	206	1.3
KH	KH270060G	ChangSung	Fe-Si@Fe-Ni	26, 40, 60, 90	9.6...165	81%	431	1.6
NeuFlux	KNF106060A	KDM	Fe-Si@Fe-Ni	19...90	12.7...165	74%	450	1.6
NanoDust™	KAM106060A	KDM	Fe-Si-Al@Fe-Ni	26...125	12.7...165	65%	180	1.3
NanoDust™	KAM106060A-AF	KDM	Fe-Si-Al@Fe-Ni	19...60	12.7...57.2	52%	150	1.0
NanoDust™ Platinum	KAM106060A-HP	KDM	Fe-Si-Al@Fe-Ni	60	12.7...132	55%	60	1.2
New NanoDust™*	KAM106060A-AH	KDM	Fe-Si-Al@Fe-Ni	26...60	12.7...132	55%	200	1.2
NanoDust™	KAH106060A	KDM	Fe-Ni@Fe-Si-Al	26...125	12.7...165	72%	250	1.3
NewFlux AL	AL270060	ACME	Fe-Ni@Fe-Si-Al	26...90	12.7...77	70%	250	1.4

* Не рекомендовано для нових розробок.

Таблиця 10. Основні параметри матеріалів з порошків аморфних і нанокристалічних сплавів

Назва матеріалу або торговельна марка	Приклад маркування осердя 26.9 x 14.7 x 11.2 мм, $\mu = 60$	Виробник	Композиція	Проникність	Зовнішній діаметр кільцевих осердь (без покриття), мм	ДСВ за 100 Ерстед (для $\mu = 60$)	Втрати за 50 кГц, 0.1 Т, мВт/см ² (для $\mu = 60$)	Вс, Т
AmoFlux®*	88894-A7	Magnetics	Fe-Si-B-C	26, 40, 60	13.5...132	57%	223	1.0
AmfusDust AM	AM270060	ACME	Fe-Si-B-Cr-C	60, 90	12.7...40	45%	180	1.45
NanoDust AN	AN270040	ACME	Fe-Cu-Nb-Si-B	30, 40	12.7...40	65%**	200	1.23
NewDust AN-GT	AN270060GT	ACME	Fe-Cu-Nb-Si-B	60	12.7...40	42%	120	1.0
CTC	CPN-106060-C	МЕЛТА	Fe-Cu-Nb-Si-B	26...125	12.7...300	45%	150	1.2

* Знято з виробництва;

** для проникності 40.

цьому позначення осердь з обох версій матеріалу однакові (табл. 8).

На відміну від **Legacy Hi-Flux™**, який знято з виробництва, популярний матеріал **FluxSan™** розвивається паралельно з удосконаленою версією під назвою **New FluxSan™**. Осердя з **New FluxSan™** виробляються під позначенням «FX» (табл. 7).

У групі популярних композитних матеріалів **Optilloy™** немає змін, проте

виробник не рекомендує застосовувати версію **OP** у нових розробках. Залежно від необхідних параметрів дроселя, матеріали **OD**, **OE**, **OC**, **New Hi-Flux™** і **GX** вважаються ефективнішими (рис. 29).

Також слід зазначити, що осердя з усіх версій сендаста від Micrometals тепер доступні в повному діапазоні зовнішніх діаметрів 3.56... 197 мм (табл. 6).

Найсуттєвіше уточнення стосується групи матеріалів під загальною назвою **NanoDust™**, які виробляє KDM. Згаданий в анонсі матеріалу хімічний елемент бор означав присутність у складі порошку аморфного сплаву. Різноманітність параметрів різних версій **NanoDust™** говорить про те, що цей матеріал є композитним, тобто таким, що складається з порошків двох або декількох МПМ.

У релізі компанії від 2024 року хімічний склад матеріалів **NanoDust™** позначений як композиція Fe-Si-Al-Ni. З огляду на заявлені виробником значення втрат, індукції насичення і DCB-характеристик, можна припустити, що всі версії **NanoDust™** складаються з різних пропорцій порошків Fe-Si-Al і Fe-Ni, отриманих методом GA (рис. 12). Таким чином, усі матеріали сімейства **NanoDust™** переміщуються з категорії аморфних/нанокристалічних МПМ до категорії композитних матеріалів, а з таблиці 10 — до таблиці 9, які набувають іншого вигляду.

ЯКИЙ КРАЩЕ?

Стрімкий розвиток технологій, коротко описаний раніше, призвів до появи широкого асортименту комерційних МПМ. Правильно обраний матеріал осердя дає змогу оптимізувати параметри дроселя і пристрою загалом. При розробці ефективного дроселя для заданого застосування доводиться аналізувати значну кількість параметрів відповідних варіантів МПМ і типорозмірів осердь. Емпіричний метод проектування, як і вибір осердя на основі його низької ціни, часто призводить до неоптимального результату. Популярні осердя з розпорошеного заліза (*Iron Powder*) марки -52 дають змогу створювати дроселі фільтрів із чудовими характеристиками, водночас є гіршим вибором для накопичувальних дроселів ІДЖ. Більш відповідним матеріалом є сендаст, який можна порівняти за ціною з *Iron Powder*. Покращені версії сендаста розширюють можливості його застосування, наприклад, осердя з **SuperSendust** і **SuperDust AG** (табл. 6) можна використовувати в дроселях ККП. Деякі задачі вимагають застосування дорожчих або спеціалізованих матеріалів.

Широкий вибір базових і композитних МПМ і конфігурацій осердь із них дає змогу проектувати дроселі з мінімальними втратами і габаритами. Вартість електроенергії, заощадженої протягом життєвого циклу пристрою завдяки застосуванню ефективнішого дроселя, може бути набагато більшою за різницю в ціні такого дроселя та альтернативного варіанта з більшими втратами.

Для зниження втрат в обмотках височастотних дроселів бажано застосовувати літцендрати або мідну фольгу відповідної товщини, але з урахуванням ємнісного ефекту між сусідніми витками та ефекту близькості. Конструктивні особливості осердь дають змогу зменшити довжину провідників обмоток. Наприклад, один виток, що розміщується на осерді з круглим керном (типорозміри PQ, EQ та ін.), щонайменше на 10% коротший, порівнюючи з витком на рівному за площею керні квадратного або прямокутного перерізу (E, U тощо). Аналогічно, під час використання кільцевих осердь витрата «міді» тим менша, чим ближча до квадрата форма їхнього поперечного перерізу.

Одне з таких кілець з розмірами 57.2×26.4×15.2 мм (без діелектричного покриття) та перерізом 15.4×15.2 мм було вибрано Ч. Цзян (Ch. Jiang) і співавторами [166] для порівняння ефективності дроселів на осердях з різних МПМ. Для тестування були взяті серійні осердя зазначеного розміру з сендаста, **High Flux**, **X-Flux™** і **MPP**. Осердя з порошку нанокристалічного сплаву Fe-Cu-Nb-Si-B, відомого під торговельною маркою **Finemet**, було виготовлено фірмою **Advanced Technology & Materials Co., Ltd.** спеціально для описуваного експерименту. Порошок, отриманий механічним подрібненням нанокристалічної стрічки, просіяли для відділення потрібної фракції з розмірами частинок 30...150 мкм.

Метод надшвидкого охолодження, який застосовують під час виготовлення стрічок із нанокристалічних сплавів, докладно описано в [106]. Діелектричне покриття нанесли методом фосфатування (CHIP NEWS, № 2, 2024), як сполучну речовину використовували епоксидну смолу.

Оскільки нанокристалічні сплави отримують з аморфних за допомогою відповідного термооброблення, продовжимо використовувати аббревіатуру «АМПМ» для позначення матеріалів з порошків як аморфних, так і нанокристалічних сплавів (CHIP NEWS, № 3, 2024).

Діапазон типових значень проникності МПМ на основі сплавів заліза становить 14...550. АМПМ зазвичай мають нижчу проникність, 30...60. Проникність деяких МПМ і зовсім обмежена єдиним значенням $\mu = 60$ (табл. 6–10). Як і в описуваному експерименті, у дроселях ІДЖ найчастіше застосовують осердя з $\mu = 60$.

Для зменшення втрат в обмотках замість одножильного дроту автори застосували літцендрат 32×0.2 мм. Методика обчислення опору літцендратів із заданими параметрами докладно описана в [167].

Зміна проникності у всіх матеріалів становила менше 1% у діапазоні частот до 500 кГц, за винятком **X-Flux™**, проникність якого знизилася на 2.8%.

На рисунку 30 наведено DCB-характеристики п'яти матеріалів, що досліджуються, отримані за допомогою LCR-метра Agilent E4980A і двох джерел постійного струму Agilent 42841A. Вочевидь, що у різних матеріалів графіки залежності проникності від напруженості поля підмагнічування мають різну крутість. Значення напруженості поля, які викликають зниження проникності до 90% від початкової для кожного з осердь, наведено в таблиці 11. За напруженості 10 А/см мінімальне зниження проникності відзначено в **X-Flux™**, а найбільше — в АМПМ. У діапазоні від 10 до 60 А/см АМПМ має найбільш пологий графік, який перетинається з графіком **MPP** за 60 А/см. За напруженості від 60 до 105 А/см найшвидше знижується проникність у сендаста. Інші МПМ у цьому діапазоні мають помітно кращу DCB-характеристику, однак за напруженості понад 103 А/см проникність **X-Flux™** знижується швидше, ніж у **HighFlux**.

На рисунках 31–33 наведені залежності втрат в осердях, що тестувались, від розмаху індукції ΔB на частотах 100, 150 та 200 кГц відповідно під час збудження струмом синусоїдальної форми. На цих частотах втрати у сендаста, **MPP** і АМПМ помітно нижчі, ніж у **High Flux** і **X-Flux™**. Можна припустити, що втрати **High Flux** і **X-Flux™** на на частотах, вищих вищих за 200 кГц, будуть неприйнятно великими, тому на частотах 450 і 600 кГц осердя з цих матеріалів не тестували.

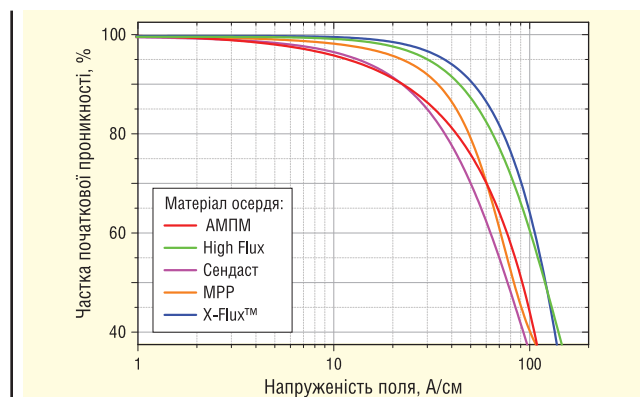



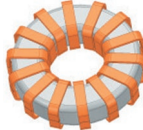
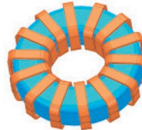


Рис. 30. DCB-характеристики осердь, що досліджуються

Таблиця 11. Специфікації осердь, що досліджуються

Параметри	Зразки				
	Сендаст	High Flux	X-Flux™	MPP	АМПМ
Колір і форма покриття, матеріал	 Fe-Si-Al	 Fe-Ni	 Fe-Si	 Fe-Ni-Mo	 Fe-Cu-Nb-Si-B
Розміри осердя, мм	57.2×26.4×15.2	57.2×26.4×15.2	57.2×26.4×15.2	57.2×26.4×15.2	57.2×26.4×15.2
Об'єм без покриття, мм ³	28600	28600	28600	28600	28600
Площа поперечного перерізу, мм ²	229	229	229	229	229
Середня довжина магнітної лінії, мм	125	125	125	125	125
Відносна проникність μ_r	60	60	60	60	60
Тип дроту обмотки	32×0.20 мм	32×0.20 мм	32×0.20 мм	32×0.20 мм	32×0.20 мм
Кількість витків	42	42	42	42	42
Індуктивність @100кГц, мкГн	244.1	243.4	238.5	243.6	243.8
Напруженість поля за 90% початкової проникності, А/см	22.4	43.4	51.4	33.8	22.4
Втрати в осерді @100 кГц, 248 мТ, Вт	25.4	75.6	67.9	32.4	38.2
Втрати в осерді @200 кГц, 248 мТ, Вт	59	171	149	70	81
Втрати в осерді @600 кГц, 75 мТ, Вт	56	–	–	50	53

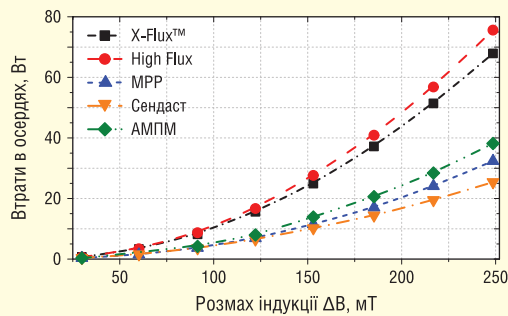


Рис. 31. Залежність втрат в осердях від розмаху індукції за 100 кГц

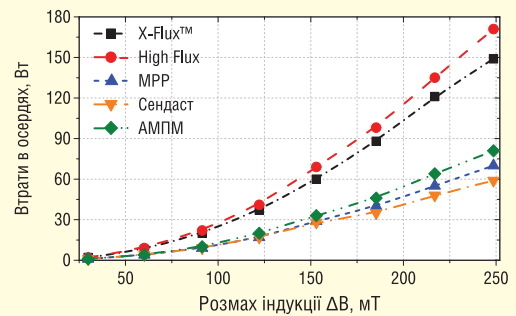


Рис. 33. Залежність втрат в осердях від розмаху індукції за 200 кГц

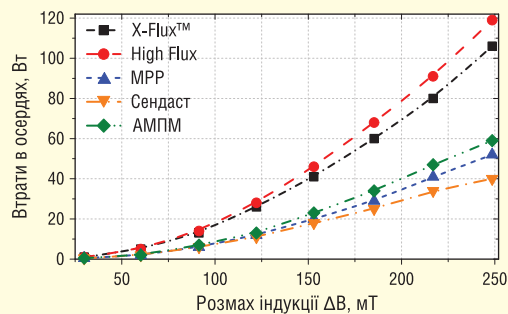
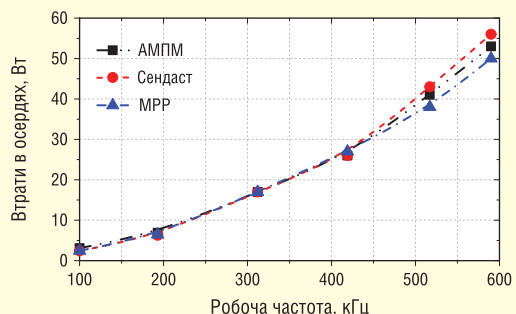


Рис. 32. Залежність втрат в осердях від розмаху індукції за 150 кГц

Рис. 34. Залежність втрат в осердях від частоти при збудженні синусоїдальним струмом 2.8 А ($\Delta B = 75$ мТ)

Змінний струм синусоїдальної форми зі значенням 2.8 А (пік-пік) генерує в осерді індукцію з розмахом 75 мТ. Як випливає з рисунка 34, втрати осердь із сендаста, АМПМ і MPP приблизно однакові на частотах до 450 кГц. На частоті 600 кГц різниця в значенні втрат більш помітна, а самі втрати збільшилися до значень 56, 53 і 50 Вт відповідно.

Таким чином, найефективнішим матеріалом у групі, що досліджувалась, виявився MPP. Сендаст перевершує АМПМ на частотах до 200 кГц, але поступається останньому в діапазоні від 450 кГц і вище. На високих частотах втрати АМПМ незначно перевищують втрати MPP за більшої, ніж у MPP, індукції насичення. З урахуванням високої відносної вартості

MPP, осердя з АМПМ можуть стати оптимальним вибором для високочастотних дроселів середньої та великої потужності. Описані раніше АМПМ (CHIP NEWS, № 3, 2024) також продемонстрували чудові частотні характеристики.

Порошки зі сплаву Finemet добре вивчені і вважаються перспективною сировиною для масового виробництва осердь з АМПМ. Одними з перших комерційних матеріалів стали NewDust AN і NewDust AN-GT, які виробляє компанія ACME з порошоків Fe-Cu-Nb-Si-B (табл. 10). Атомізовані методом SWAP [43] порошки Finemet мають високу твердість, тож розроблені методи ізоляції та ущільнення магнітних частинок

обмежують зовнішній діаметр кільця розміром 40 мм при невеликому виборі значень проникності, а саме 30 і 40 для **NewDust AN** та 60 для **NewDust AN-GT**. Наразі розробляються технології, які дадуть змогу значно збільшити розміри осердь з атомізованих порошків **Finemet**.

Для накопичувальних дроселів потужних інверторів, а також для резонансних дроселів у топології перетворювачів, які використовуються в SuperCharge електромобілів [168], необхідні осердя зі значною енергоємністю, яка визначається їхніми габаритами й проникністю. На відміну від АМПМ, кільцеві осердя з сендаста і **MPP** виробляються із зовнішнім діаметром до 197 і 165 мм відповідно.

MPP ЧИ СЕНДАСТ?

Завдяки тому, що кристалічні ґратки сплавів Fe-Si-Al і Fe-Ni-Mo мають нульову відносну зміну об'єму під час намагнічування, обидва матеріали мають нульову магнітострикцію. Що менша магнітострикція матеріалу, то нижчі його втрати на перемагнічування. Як було показано вище, сумарні втрати кожного з матеріалів на частотах до 450 кГц приблизно однакові, проте складові втрат відрізняються. Зі зростанням частоти у **MPP** збільшуються динамічні втрати, а у сендаста — втрати на перемагнічування. Хоча **MPP** має найнижчу індукцію насичення серед широко застосовуваних МПМ (0.8 Т), цей матеріал забезпечує найкраще поєднання параметрів, тому в більшості випадків є оптимальним матеріалом осердь для дроселів ІДЖ.

Головним недоліком осердь з **MPP** є їхня висока ціна. У випадках, коли не вдається домогтися бажаного балансу між ціною та економією, яку можуть забезпечити осердя з **MPP**, хорошою альтернативою стають різні версії сендасту, а також АМПМ. При зовнішньому діаметрі кільця від 27 мм і більше різниця в ціні може бути суттєвою. Осердя з деяких матеріалів, наприклад, **HP** з проникністю 19 та 26 від компанії ChangSung, мають менші сумарні втрати, ніж такі самі з **MPP**, за значно меншої вартості осердь з **HP**.

До переваг сендаста також слід віднести його меншу густину. Наприклад, сендастове осердя з проникністю 60 на 25% легше за таке саме осердя з **MPP**.

14, 26 ЧИ 60?

Значення втрат залежить від розмаху індукції та частоти змінного магнітного потоку в осерді. У загальному випадку, втрати на перемагнічування вищі, а динамічні втрати менші в осердь з низькою проникністю. Спочатку варіанти **MPP** з проникністю 14, 26 і 60 були розроблені для застосування у високочастотних дроселях апаратури телекомунікації та зв'язку. Сендаст з низькою проникністю з'явився пізніше у відповідь на потреби ринку.

Найчастіше в дроселях ІДЖ застосовують осердя з проникністю 60, а також 125. Такі значення забезпечують баланс між втратами в обмотці, втратами в осерді та ДСВ-характеристикою матеріалу. Осердя з проникністю 14 і 26 здатні накопичити істотно більше енергії, ніж такі самі з проникністю 60 і 125, однак для намагнічування осердь з низькою проникністю необхідний струм більшої сили, який спричиняє надлишкові втрати в обмотці. Безперервна або тривала робота такого дроселя за сильного намагнічування є непрактичною. Важливою властивістю осердь із проникністю 14 і 26 є стабільність проникності за сильного підмагнічування постійним

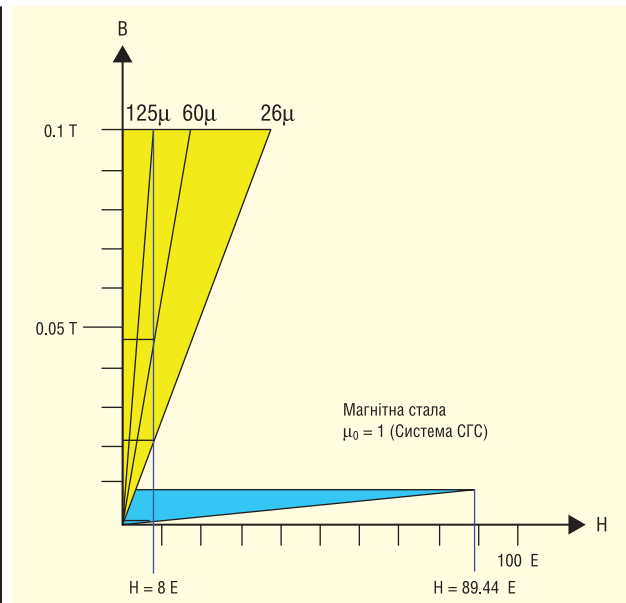


Рис. 35. Графічне представлення питомої енергоємності осердя для різних значень проникності [172]

струмом та/або за різких змін струму навантаження. Значна питома енергоємність таких осердь ефективно використовується за короткочасного, або періодичного зростання намагнічувальної сили, за якого залишається достатньо часу на охолодження обмотки. Залежність питомої енергоємності осердя від проникності показано на рисунку 35.

У більшості випадків, плавне збільшення індуктивності дроселя ІДЖ при зниженні струму в обмотці є корисною властивістю. Мінімальне значення індуктивності визначається заданим розмахом пульсації струму, зазвичай не більше 20% максимального струму навантаження. Струм, що протікає через обмотку дроселя, зворотно залежить від індуктивності, тому збільшення індуктивності в разі зниження струму відповідає потребам розробника ІДЖ. І навпаки, характеристика насичення осердь із проникністю 60 і 125 дає змогу зменшити розміри дроселя, оскільки за повного струму навантаження потрібна мінімальна індуктивність.

Особливим випадком є розробка ІДЖ, що вимагають швидкої реакції на різку зміну струму навантаження, наприклад, систем живлення крокових двигунів. Під час увімкнення таких двигунів навантаження різко змінюється від мінімального до максимального і навпаки, що вимагає швидкого відгуку ІДЖ. Для стійкої роботи в такому режимі індуктивність дроселя має бути мінімально можливою та максимально стабільною, що досягається застосуванням осердь із низькою проникністю та підвищенням робочої частоти перетворювача. Низька проникність дає змогу зменшити ΔB і знизити втрати в осерді. Натомість на противагу цьому стає зростання втрат в обмотці, які можуть бути зменшені при використанні літцендратів [167].

Найчастішим прикладом застосування осердь з низькою проникністю є підвищувальний дросель коректора коефіцієнта потужності (ККП). Стабільна індуктивність дроселя бажана для всього діапазону струму мережі живлення (50/60 Гц), що протікає через обмотку. Це дає змогу зменшити викиди струму під час пікових значень намагнічувального поля. Візуалізацію процесу виникнення викидів наведено в [169].

Таким чином, застосування осердь із проникністю 14 і 26 виправдане за таких умов експлуатації або вимог до параметрів дроселів:

- циклічні пікові навантаження, в паузах між якими обмотка встигає охолоджуватися;
- стабільність індуктивності дроселя в широкому діапазоні квазістабільних або швидко мінливих струмів навантаження;
- стійкість до пікових перевантажень;
- підвищення робочої частоти ІДЖ для зниження сумарних втрат в осердях внаслідок невеликого ΔB і низьких динамічних втрат.

ПРОНИКНІСТЬ І ПИТОМА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ

Проникність матеріалу — це відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування. На рисунку 35 показано залежність індукції в осердях з ідеальних матеріалів із проникністю 26, 60 і 125 від намагнічувальної сили. Ідеальним вважається матеріал з постійною проникністю і нульовими втратами, що відображається трьома прямими лініями на графіку, проведеними з початку координат. Такі самі графіки для реальних матеріалів мали б складніший вигляд, однак для розуміння співвідношення між проникністю та питомою енергоємністю розглянемо саме ідеальні матеріали.

Використовуючи закони Фарадея та Ампера [170], можна показати, що площа трикутника між лінією, яка відповідає зазначеній проникності, та вісью ординат, на якій відкладається значення індукції в осерді, відповідає питомій енергоємності осердя з цього матеріалу, або вакууму в разі немагнітного осердя, вираженої в Дж/м³ [171].

Для ілюстрації взаємовідносин між напругою, струмом, магнітною індукцією, намагнічувальною силою і розмірами осердя, звернемося до рисунка 36. Відповідно до закону Фарадея, індукція в осерді визначається як вольт-секунда, прикладена до обмотки, поділена на кількість витків обмотки і на площу поперечного перерізу осердя. Закон Ампера визначає намагнічувальну силу (магніторухійну силу) як ампер-виток на середню довжину магнітної лінії осердя [170]. Отже, добуток величини магнітного потоку і намагнічувальної сили має розмірність вольт-ампер-секунда на кубічний метр або джоуль на кубічний метр об'єму осердя.

Повертаючись до рисунка 35, можна показати, що за заданої намагнічувальної сили густина енергії, що накопичується, прямо пропорційна проникності

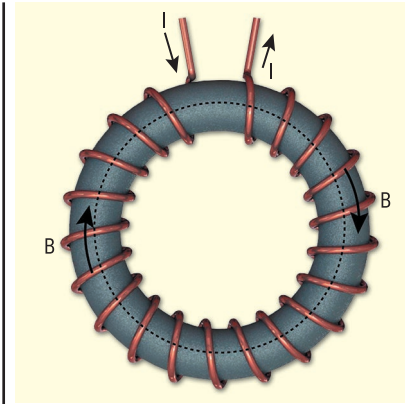


Рис. 36. Магнітне поле в тороїдальному осерді

матеріалу. Проникність матеріалу осердя показує, у скільки разів більшою може бути густина енергії порівняно з енергією, що накопичується, в немагнітному осерді, наприклад, зробленому з нейлону. Вертикальна лінія на позначці 8 Ерстед обмежує площу трикутника ($B \times H/2$) і дає змогу порівняти густину енергії для чотирьох значень проникності. Вочевидь, за сили 8 Ерстед осердя з $\mu = 125$ накопичує більше енергії, ніж осердя з меншою проникністю. Щоб накопичити таку саму кількість енергії, немагнітному осердю з $\mu_0 = 1$ потрібна сила понад 89 Ерстед. З рисунка також випливає, що осердя з найменшою проникністю накопичує найбільшу кількість енергії за однакового значення магнітної індукції. За умови, що втрати в осерді за $\Delta B = 0.1$ Т на лінійній ділянці петлі гістерезису, а також втрати в обмотці, які виникають за намагнічувальної сили 38 Ерстед, мають прийнятні значення, матеріал із проникністю 26 забезпечує найбільшу енергоємність.

Отже, вибирати проникність осердя потрібно з огляду на максимальну робочу індукцію матеріалу і найбільшу практичну намагнічувальну силу. Максимальна індукція в осерді обмежується індукцією насичення обраного матеріалу або втратами на перемагнічування на високих частотах. Величина намагнічувальної сили обмежується прийнятним значенням втрат в обмотці.

У загальному випадку, що більше осердя, то при більшій намагнічувальній силі воно може функціонувати, оскільки при збільшенні розмірів зростає співвідношення площі вікна намотування і середньої довжини магнітної лінії. Звернемося до прикладу дроселя на тороїдальному осерді (рис. 36), діаметр дроту і струм в обмотці в усіх випадках вважаємо однаковими. Зі збільшенням діаметра кільця стає можли-

вим розмістити більшу кількість витків упродовж середньої довжини магнітної лінії осердя, тобто збільшити кількість ампер-витків на довжину магнітної лінії без збільшення питомих втрат в обмотці. У результаті, проникність осердя може бути зменшена, а густина енергії, що накопичується, збільшена при такому ж значенні магнітної індукції.

Одним з перспективних напрямків розвитку силових дроселів вважається т. з. гібридна технологія, в якій одна частина осердя виробляється з фериту, а інша — з МПМ. Надалі розглянемо приклади застосувань таких осердь.

Далі буде

Більш детальну інформацію щодо застосування осердь із МПМ та їх придбання можна отримати, звернувшись до компанії ТОВ «НВП АСТЕРА»:

**61072, Україна, м. Харків,
вул. Тобольська, 42, оф. 222,
факс: (+38) 057-728-1808,
тел.: (+38) 057-757-2859,
(+38) 050-323-3763,
(+38) 067-575-4440,
(+38) 068-616-7777,
e-mail: ferrite@ukr.net,
www.ferrite.com.ua**

Література:

166. Ch. Jiang, X. Li, S. S. Ghosh, H. Zhao, Y. Shen, T. Long. *Nanocrystalline Powder Cores for High-Power High-Frequency Power Electronics Applications*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2019.
167. M. Bartoli, N. Noferi, A. Reatti, M. K. Kazimierzuk. *Modeling Litz-wire winding losses in high-frequency power inductors*. PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference.
168. A. Aulakh. *EV Charging Power Topologies Design Guidebook*. PRD-08367 REV 1.0, January 2024.
169. www.ferrite.com.ua/doc/CN/surge_currents.gif
170. Lloyd H. Dixon. *Magnetics Design for Switching Power Supplies*. Sections 1–7. TI literature Nos. SLUP123, SLUP124, SLUP125, SLUP126, SLUP127, SLUP128, and SLUP129.
171. L. R. Diana. *Practical Magnetic Design: Inductors and Coupled Inductors*.
172. T. Slattery. *A Comparison of Molybdenum Permalloy Powder and Sendust Cores for Energy Storage Inductors*. The Arnold Engineering Company, Marengo, Illinois, USA, 2000.