

# Indukcyjności

## To nie takie straszne, część 2

*Chyba każdy elektronik – praktyk, próbujący za pomocą lutownicy i garści drobiazgów wskrzesić do życia jakieś nowe urządzenie, stanął kiedyś przed barierą nie do pokonania – na schemacie znalazł się jakiś wrogi element – ELEMENT INDUKCYJNY!*

### Rdzenie proszkowe

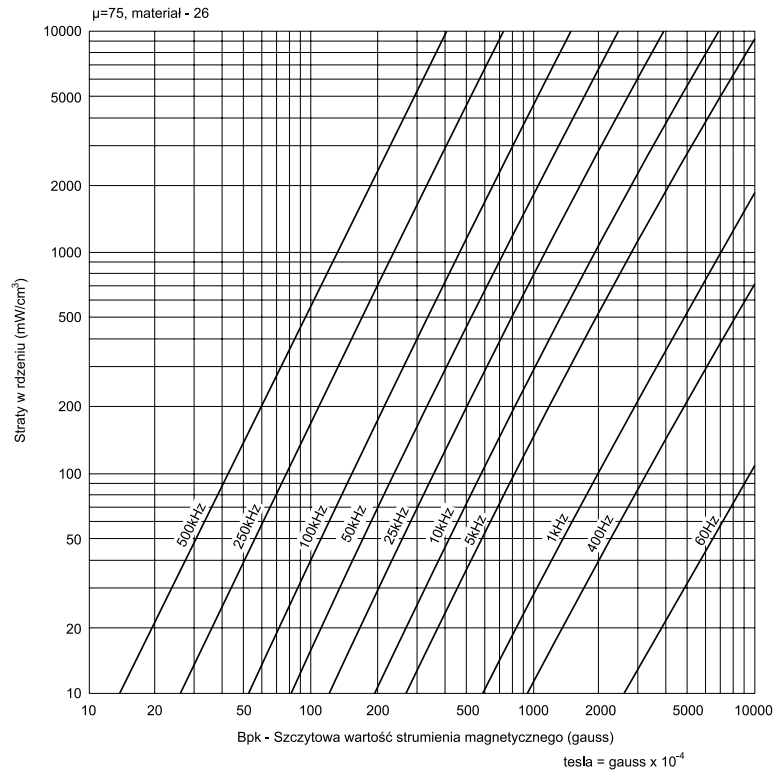
Kolejnym rodzajem materiałów magnetycznych miękkich jest sproszkowane żelazo. Zmielone na małe drobiny, zmieszane w niektórych przypadkach z pewnymi „ulepszaczami” zostaje poddane wraz z wypełniaczem organicznym, sprasowaniu pod dużym ciśnieniem w odpowiedniej formie. Forma nadaje materiałowi magnetycznemu kształt rdzenia. Po sprasowaniu takiego materiału, pomiędzy drobinami żelaza pozostają przerwy, tworząc tak zwaną rozproszoną szczelinę występującą w całej objętości rdzenia. Rdzeń wykonany z takiego materiału posiada nieliniową charakterystykę magnesowania w funkcji zewnętrznej siły magnesującej, w związku z tym, jego specyficzne własności są wykorzystywane do gromadzenia dosyć dużych ilości energii. Zwykle rdzenie wykonane z czystego proszku żelaza (materiał –26) należą do najtańszych

Rys. 5.

i najbardziej popularnych materiałów. Indukcja nasycenia rzędu 1,2 Tesli, a także maksymalna częstotliwość pracy ok. 80 kHz powodują, że trzeba stosować także bardziej wyrafinowane materiały (rys. 5).

Do takich należą: materiał –2 z bardzo niską przenikalnością po-

czątkową, wysoką częstotliwością graniczną, bardzo małymi stratami mocy, dużą liniowością i stabilnością temperaturową, ale za to charakteryzujący się dużymi gabarytami; materiał –8 łączy pozytywne cechy dwóch wcześniej wymienionych materiałów, za to stosunkowo drogi.



Zastosowanie	Rodzaj materiału											
	-2	-8	-14	-18	-26	-30	-34	-35	-38	-40	-45	-52
Regulatory oświetlenia												
50 Hz dławiki zakłóceń asymetrycznych w filtrach EMI												
dławiki DC: <50 kHz												
dławiki DC: ≥ 50 kHz												
układy korekcji współczynnika mocy: <50 kHz												
układy korekcji współczynnika mocy: ≥ 50 kHz												
układy rezonansowe: ≥ 50 kHz												

Musimy jednak pamiętać o poważnej wadzie, jaką posiadają rdzenie proszkowe. Jest nią niestety podatność na proces starzenia się rdzeni. Jest to proces nieodwracalny. Występuje on przy pracy w wysokich temperaturach, a jego przyczyną jest wypęniacz. Aby nasze urządzenie żyło jak najdłużej nie starajmy się zbyt „żyłować” jego możliwości. Zalecana jest więc praca wszystkich rdzeni proszkowych w temperaturze do 90°C. Typowe zastosowania rdzeni proszkowych przedstawiono w **tab. 1**.

Grzechem byłoby nie wspomnieć w tej części artykułu o rdzeniach typu Super-MSS, uznawanych dzisiaj za najbardziej wartościowy materiał magnetyczny. Ten rodzaj proszków posiada cząsteczki oddzielone izolacją, która została specjalnie opracowana dla niskich przenikalności. Izolacja ta jest nieorganiczna, co pozwala osiągnąć wyższe wydajności w wyższych temperaturach. Natomiast jej dobre właściwości na przebiecie elektryczne docenimy podczas dużych obciążeń prądowych, w których jak wiadomo mamy do czynienia z grubymi przekrojami drutów nawojowych.

Sproszkowany metal użyty w rdzeniach SUPER-MSS jest głównie stopem żelaza z małą ilością krzemu i aluminium. Pozbawiony kosztownego niklu może zapewnić nam jeszcze dodatkowe korzyści:

- pozbawienie magnetostrykcji, która jest zjawiskiem polegającym na zmianie wymiarów materiału znajdującego się w polu magnetycznym,
- wysoka zdolność magazynowania energii,
- małe straty (10x mniejsze w odniesieniu do rdzeni proszkowych),
- stabilność indukcyjności w funkcji bezpośredniego prądu polaryzacji,
- wysoka impedancja przy wysokiej częstotliwości,
- małe zmiany indukcyjności w funkcji prądu zmiennego.

Rdzenie SUPER-MSS znajdują głównie zastosowanie w aplikacjach zaprojektowanych na dużą moc i tam, gdzie gromadzenie dużej energii magnetycznej staje się istotnym faktem (**rys. 6**).

Rdzenie te zostały projektowane z myślą o zastąpieniu rdzeni ze sproszkowanego żelaza w układach pracujących w zakresie częstotliwości 25...500 kHz, przy zachowaniu wysokiej stabilności parametrów w czasie

**Tab. 2. Materiały przystosowane do wysokich częstotliwości pracy (Ni-Zn)**

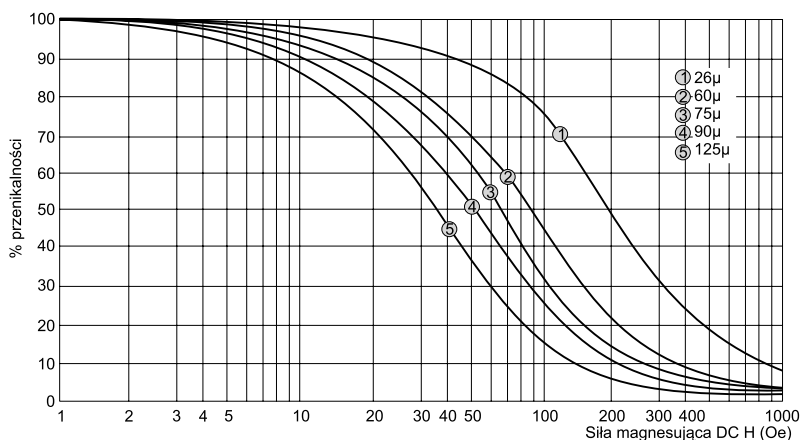
Przenikalność początkowa	13	25	80	125	300	900	2000
ISKRA FERRITI	2E	1E	1F	3F	2C	1C	4C
EPCOS	U17	K12	K1	K1	M11	K10, 400	N4
FERROXCUBE	4E1	4E2	4D2, 4F1	4C6, 4C65	4B1, 4B2, 4B3	4A11, 4A15, 4S2	4A15
VOGT	Fi110	Fi130	Fi150, Fi221	Fi212	F221, Fi242, Fi222i	Fi292	
NEOSID/MMG	F29	F28	F25	F01, F16	F14, F302	F19, F52	F11
LCC THOMSON	H6, K6	H5, K5	H3, K3	H3, K3	H2	H1, C1	
KASCHKE	K14	K40	K80	K80, K120	K250, K300	K800, K900	K1500, K2000
TRIDELTA		Mf321	Mf340	Mf343	Mf251	Mf260	
SAGEM			602	602		701	
PRAMET					N3	N7, H5R	
POLFER	U-11	U-31	F-82		F-201, F-302		
EM-VAC						NF10	
TDK	K8	K7A	K6A		K5		
FDK – FUJI	H56Z	H55Z	H54Z	H53Z	H52Z		
TOKIN	10L				250L	700L	
CERAMIC/MAGNETICS	N40	C2075	C2050	C2025	CMD10	CN20	CMD5005
NEOSID		F40	F106		F2		
FAIR RITE	68	67	65	61	64, 83	43	
STEWARD	21		22	23		26, 28	
COSMOFERRITES					CF102M		
FERRIT		30BH	150BH	100NH	300BHC	900HM, 600NN, 900HKC	
BALFORD/EEL		K8	K8	K10	K4		
FERRONICS		P		K		J	G

pracy. Rdzenie takie mogą być wykorzystane w różnych układach, między innymi:

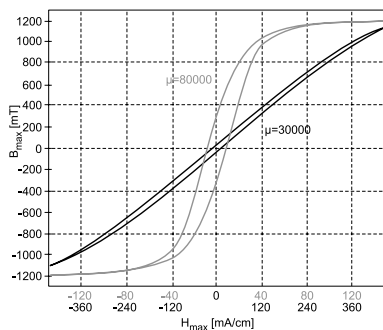
- w zasilaczach impulsowych jako dławik wyjściowy,
- w regulatorach współczynnika mocy (PFC),
- w transformatorach mocy,
- w układach rezonansowych,
- w filtrach EMI, do tłumienia zakłóceń asymetrycznych.

### Nanokryształy

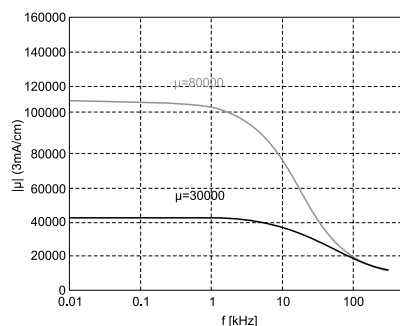
Czas na nanokryształy, czyli w tym przypadku Nanopermy, które powstają w procesie gwałtownego schładzania metalu i jednocześnie formowania w bardzo cienką taśmę. Materiał, który tak powstanie charakteryzuje się drobną mikrostrukturą krystaliczną. Typowe rozmiary ziarna są na poziomie 10 nm i dlatego też już wiadomo, dlaczego taki materiał nazywa



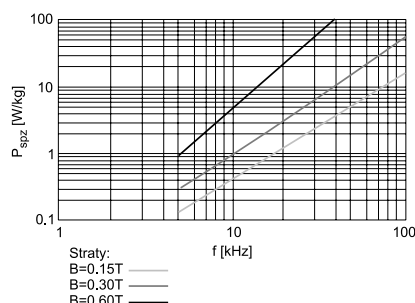
Rys. 6.



Rys. 7.



Rys. 8.



Rys. 9.

się nanokrystalicznym. Drobnziarnista struktura materiałowa jest cechą, która pozwala na osiągnięcie niezwykłych właściwości międko magnetycznych. Jest to materiał bezpostaciowy, który podczas gwałtownego schładzania nie zdążył się skryształizować i uzyskał nową postać, stan skupienia zwany szklistym metalem.

Podstawowe cechy Nanopermów:

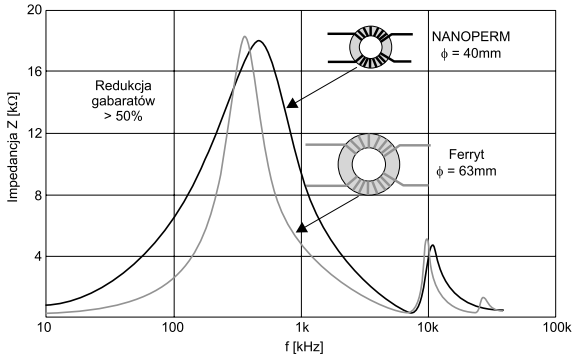
- skład stopu -  $Fe_{73,5} Cu_1 Nb_3 Si_{15,5} B_7$ ,
- gęstość strumienia nasycenia  $B_{sat}$  - 1,2 T,
- poziom przenikalności  $\mu$  - 20000 ...200000(niespotykany w innych materiałach magnetycznych),
- nasycenie magnetostrykcji <0,5 ppm,
- elektryczna rezystywność - 115  $\mu\Omega cm$ ,
- gęstość - 7,35  $g/cm^3$ ,
- temperatura Curie  $T_c$  - około 600°C,
- maksymalna temperatura pracy

Tab. 3. Materiały o małych stratach

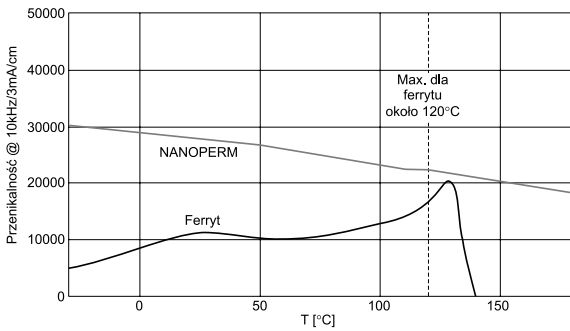
Przenikalność początkowa	750	2000	2300
ISKRA FERRITI	10G	26G	16G
EPCOS	M33	N45, N48	N22, N26
FERROXCUBE	3D3	3B6, 3H3	3B7, 3H1
VOGT	Fi850, Fi262		Fi323
NEOSID/MMG	F58	P12	P10, P11
LCC THOMSON	S5, C5	S4, T9, S3	A9, S1
KASCHKE	K700, K600	K2007	K2005
TRIDELTA	Mf143	Mf166	Mf183
SAGEM	509	507	506
PRAMET			H20
POLFER	F-605		F-2001
EM-VAC			M2F, M2F-A
TDK	H6F	H6K, H8B	H6B
FDK - FUJI	H52B, 3H01	H22Z, 3H20	3H21
TOKIN		F2001	F2003
CERAMIC/MAGNETICS	MN67		MN80
MAGNETICS	A	G	D
NEOSID	F08		F02, F2001
FERRIT	700HM		
BALFORD/EEL		Q7	Q6

Tab. 4. Materiały o wysokiej przenikalności

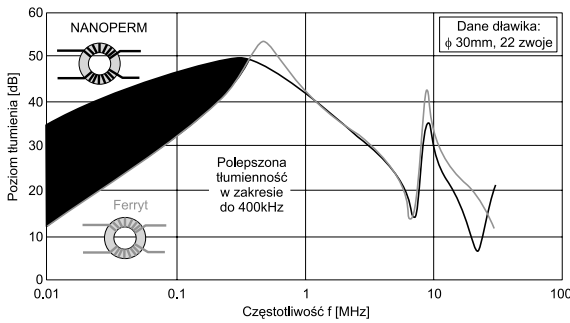
Przenikalność początkowa	4300	6000	10000	12000	15000
ISKRA FERRITI	19G	22G	12G	32G	52G
EPCOS	N30	T37, T35	T44, T38	T42	T46
FERROXCUBE	3S1, 3E4, 3C11	3E27, 3E25	3E5	3E6	3E7
VOGT	Fi340	Fi360	Fi410		
NEOSID/MMG	F9N, F9	F10, FT6	F39, FTA		
LCC THOMSON	A6, T6	A4, A5, T4	A3, A2		
KASCHKE	K4000	K6000	K8000, K10000		
TRIDELTA	Mf185, Mf193	Mf187, Mf197	Mf199		
SAGEM	512	511	515		
PRAMET	H40	H60			
POLFER	F4001				
EM-VAC	M5, M4	M5, M6			
TDK	H5A, H7A	HS52, H5B	HS1, H5C2	H5D	
FDK - FUJI	2H04	2H06	2H10		2H15
HITACHI/NIPPON	GP7	GP5, GQ5C	GP11		
TOKIN	H4000	H6000		H12000	
CERAMIC/MAGNETICS	MN30	MN60	MC25		
MAGNETICS	T, J	J	W		
NEOSID	F830	F860			
FAIR RITE		75	76		
STEVARD	34		40		
TSC	TSF5000		TSF010K		
TOMITA	2E3	2E1	2E2		
ACME	A05	A07	A10		
COSMOFERRITES	CF195	CF195	CF197		
BALFORD/EEL	T2	T4			
FERRONICS	B		T		



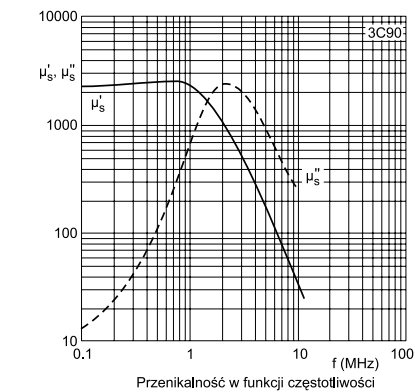
Rys. 10.



Rys. 11.



Rys. 12.



Rys. 13.

- Tmax – około 120°C (180°C),
- straty rdzenia (0,3 T, 100 kHz, sinus) Pv – <110 W/kg,
- grubość taśmy d – 17/23 μm.

Właściwości i zalety nanokrystalów najlepiej można poznać analizując ich charakterystyki przedstawione na rys. 7...12.

### Ferryty

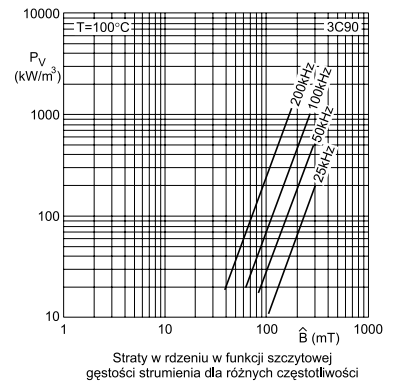
Na koniec zostawiłem ferryty, które są materiałem mikrokrystalicznym, zbudowanym z kryształków tlenku żelaza (Fe2O3) i różnych domieszek metali. Rozróżniamy dwie najczęstsze kombinacje chemiczne występujące w materiale ferrytowym. Jest to kombinacja manganowo – cynkowa (Mn-Zn) i niklowo – cynkowa (Ni-Zn). Mangan i cynk oznaczają wyższą przenikalność i indukcję nasycenia Bs w porównaniu z jego niklowo – cynkowym bratem charakteryzującym się wyższą rezystywnością i pracującym ze znacznie wyższymi częstotliwościami. Najprostszą metodą identyfikacji rdzenia jest jego „zbadanie”. Po pierwsze sprawdzamy pilnikiem, czy jest twardy, czy miękki. Jeżeli jest miękki, to jest to jeden z materiałów proszkowych, jeżeli natomiast jest twardy i kruchy, to mamy do czynienia z ferrytem. Po nadpiłowaniu dwóch punktów uzyskujemy dostęp do gołego rdzenia. Możemy teraz zmierzyć jego rezystancję. Jeżeli jest niska, to jest to Mn-Zn, jeżeli wysoka, to Ni-Zn. Do dość popularnych materiałów Mn-Zn można zaliczyć 3C85, 3C90, 3F3 i 3F35 (będziemy się posługiwać oznaczeniami firmy FERROXCUBE ze względu na ich popularność na naszym rynku) wykorzystywanych między innymi w przetwornicach impulsowych; 3E27, 3E5, 3C11 o średniej i wysokiej przenikalności magnetycznej występujący w układach filtrów EMI; 3H3, 3D3, które zostały docenione w przemyśle telekomunikacyjnym pokrywając pasmo do 2 MHz.

Podstawowe zależności między głównymi parametrami, niektórych z tych materiałów, przedstawiają wykresy na rys. 13...19. Bardzo ogólna zasada mówi, że im niższa jest przenikalność początkowa, tym wyższą częstotliwością pracy charakteryzuje się dany materiał.

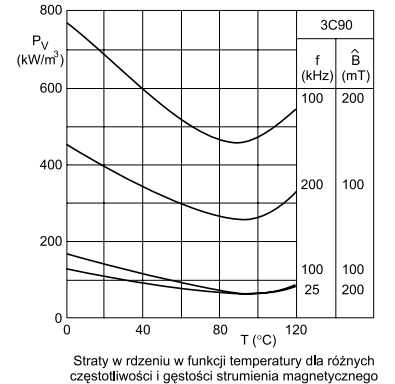
Co w rodzinie to nie zginie, więc trochę również o niklu i cynku. Tutaj warto zwrócić uwagę na materiały typu 4A11, 4B1, 4C65, 4E2, które są używane w dławikach szerokopasmowych EMI, czy też w naszych domowych antenach, jako część elementu symetryzatora. Częstotliwość pracy elementów niklowo – cynkowych sięgają zazwyczaj już MHz i o tym warto pamiętać (rys. 20, 21)

Ze względu na kształt i wymiary, materiały ferrytowe występują w największej ilości na rynku magnetycznym. Mamy tu do czynienia z toroidami, kształtkami typu EE, EFD, ETD, UU, RM, P, EP,

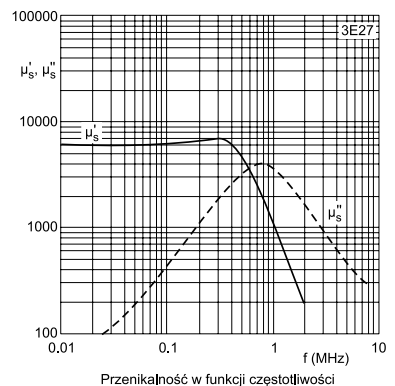
Straty w rdzeniu w funkcji szczytowej gęstości strumienia dla różnych częstotliwości



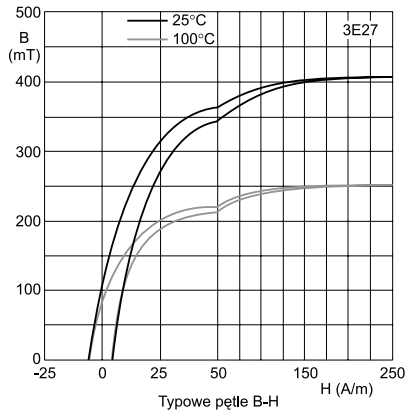
Rys. 14.



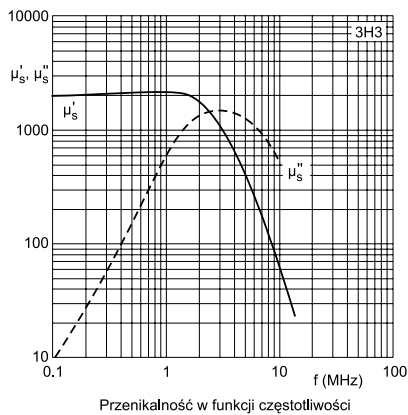
Rys. 15.



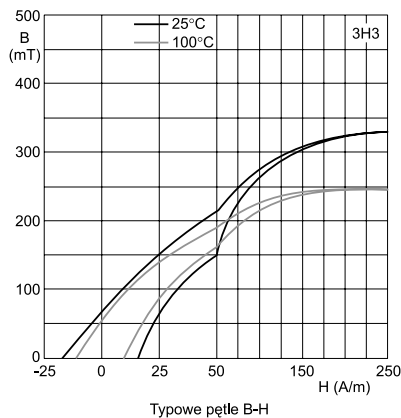
Rys. 16.



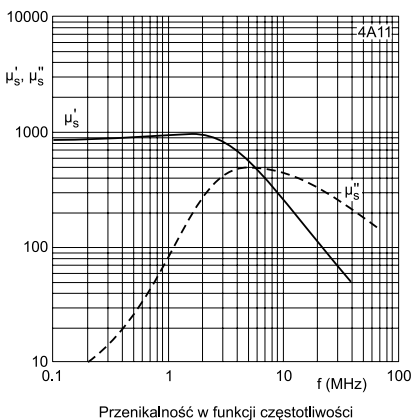
Rys. 17.



Rys. 18.



Rys. 19.



Rys. 20.

Tab. 5. Materiały mocy

Przenikalność początkowa	3000	2000	2300	2200	2000	1300
ISKRA FERRITI	25G	15G	45G	35G	65G	75G
EPCOS	N41	N27	N67	N87	N97	N49, L49
FERROXCUBE	3B8	3C10, 3C80	3C81, 3C85	3C90, 3F3		3F4, 3F35
VOGT	Fi323	Fi322	Fi324			
NEOSID/MMG	F5A, F5C	F5	F44	F45	F47	
LCC THOMSON	B1	B5, B6, B3	B2, B4, F1	F2		
KASCHKE		K2004	K2006	K2008		
TRIDELTA	Mf196B	Mf196A, Mf196	Mf198	Mf198A		
SAGEM		516, 517	527			
PRAMET		H21	H24			
POLFER		F807	F814			
EM-VAC		M2TN-B	M2TN-C			
TDK	PC30	HV22, PC30	PC40	PC44, PC40	PC50, PC44	PC47
FDK – FUJI	6H10	5H20	6H10	6H40, 6H20	7H10, 6H40	7H10
HITACHI/NIPPON	SB-5S	SB-3L	SB-7L, BS-7C	SB-9C	SB-1M	
TOKIN	B3100	B2500	B25		B40	
CERAMIC/MAGNETICS			MN80			
MAGNETICS	F			R	P	
NEOSID		F827	F867	F887		
FAIR RITE		77	78			
STEWARD			32			
TSC		TSF7070	TSF7099	TSF5080		
TOMITA	2E6	2E6C				
ACME	P2					
COSMOFERRITES	CF101	CF196	CF129	CF138		
BALFORD/EEL		L2				

ER, planarami, walcami, walcami z otworem, RKS-ami dwu i wielotworowymi oraz z zintegrowanymi elementami indukcyjnymi typu IIC. O tych wszystkich materiałach, a także o niewymienionych wyżej opowiemy w następnych odcinkach.

Często zastanawiamy się nad tym, jaki materiał lub, jaki odpowiednik materiału będzie w naszej aplikacji najlepszy. Dane zebrane w tab. 2...4 na pewno pomogą zdecydować o wyborze. Są w nich zamieszczone materiały producentów, których już nie ma na rynku, ale zwyczajowo wielu elektroników posługuje się tymi oznaczeniami.

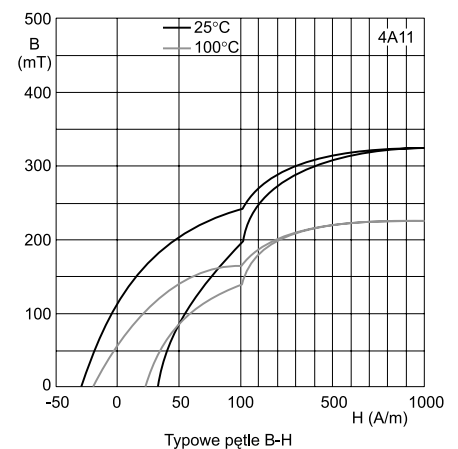
Itoby by było na tyle tej opowieści. Dla szerszego zapoznania się z materiałami magnetycznymi zapraszam do lektury oferowanej przez ich producentów. Znajdziecie ją między innymi na ich stronach internetowych, jak również w katalogach firmowych. Niech moc będzie z Wami.....

**Konstruktor firmy Feryster  
Tomasz Szycko**

*Literatura:*

1. M. Soiński, „Materiały magnetyczne w technice”, COSiW, Warszawa 2001 r.
2. A.Gerfer, H.Zenker, B.Rall „Trilogy of inductors”,WE

[www.arnoldmagnetics.com](http://www.arnoldmagnetics.com)  
[www.ferroxcube.com](http://www.ferroxcube.com)  
[www.feryster.com.pl](http://www.feryster.com.pl)  
[www.micrometals.com](http://www.micrometals.com)



Rys. 21.