

Wyznaczenie temperatury Curie i materiału wykonania rdzenia transformatora na podstawie jego właściwości magnetycznych

Maksymilian Nguyen

CLF, Ćwiczenie 20, Maj 2023

Streszczenie

Używając transformatora i grzałki podłączonej do jego rdzenia dokonano pomiarów napięcia na obwodzie wtórnym w zależności od temperatury podczas ogrzewania rdzenia i jego chłodzenia. Na podstawie analizy pomiarów wyznaczono temperaturę Curie dla rdzenia, jego materiał wykonania i zaobserwowano histerezę.

1. Wstęp

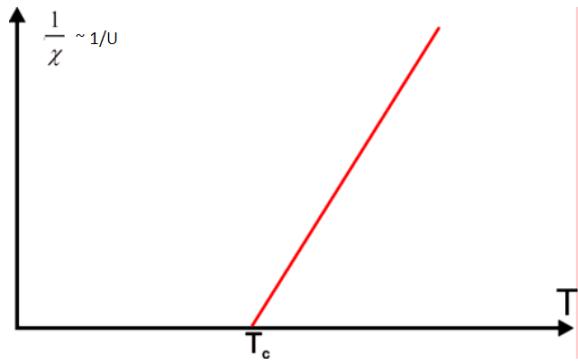
Celem ćwiczenia było wyznaczenie temperatury Curie i materiału wykonania rdzenia transformatora za pomocą pomiarów napięcia na użwojeniu wtórnym w zależności od temperatury tego rdzenia.

Rdzeń transformatora jest ferromagnetykiem. Oznacza to że jest on zbudowany z atomów posiadających niezerowe spiny (momenty magnetyczne) [1]. Właściwości ferromagnetyczne ciała występują gdy atomy tego ciała są paramagnetyczne w stanie gazowym, więc konsekwencją tego jest iż ferromagnetykiem może być tylko ciało stałe. Gdy atomy są regularnie ułożone w sieci krystalicznej dochodzi do spontanicznego sprzężenia spinów. Poniżej temperatury Curie sprzężenie te powoduje równoległe ułożenie spinów w pewnych obszarach (domenach). Powyżej temperatury Curie natomiast drgania cieplne są silniejsze od sił porządkujących i powodują zanik uporządkowania domenowego [2]. Ciało więc staje się paramagnetykiem i można opisać jego podatność magnetyczną wzorem:

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}, \quad (1)$$

gdzie C - stała Curie, T_c - temperatura Curie, T - temperatura ciała.

Na Rysunku 1 przedstawiono zależność odwrotności podatności magnetycznej χ od temperatury.



Rysunek 1: Zależność odwrotności podatności magnetycznej χ od temperatury paramagnetyka. Dla małych wartości χ można przyjąć przybliżenie że mierzone napięcie na obwodzie wtórnym jest liniową funkcją podatności [4]. Pozwala to na wyznaczenie temperatury Curie jedynie z pomiarów napięcia i temperatury. Rysunek z pracy [1].

Poniżej temperatury Curie w ferromagnetycznym rdzeniu transformatora domeny układają się pod wpływem pola magnetycznego pochodzącego z obwodu pierwotnego i wzmacniają to pole. Obserwujemy pewne napięcie na obwodzie wtórnym. Po przekroczeniu temperatury Curie i przejściu rdzenia w stan paramagnetyczny powinien zostać zaobserwowany spadek napięcia związany ze zniszczeniem uporządkowania spinów.

W stanie paramagnetycznym zachodzi zależność (1) jak i relacja z Rysunku 1. Można zapisać więc wzór:

$$U \approx \frac{C}{T - T_c}, \quad (2)$$

gdzie U to napięcie na obwodzie wtórnym. Wzór (2) można przekształcić do wzoru funkcji liniowej:

$$\frac{1}{U} \approx aT + b, \quad (3)$$

gdzie a i b to stałe. Na podstawie danych pomiarowych temperatury i napięcia można wyznaczyć parametry a , b metodą najmniejszych kwadratów. Wiedząc że prosta o równaniu (3) przecina osią T (Rysunek 1) w punkcie temperatury Curie (T_c), można dojść do prostej zależności:

$$T_c = \frac{-b}{a}, \quad (4)$$

która pozwoli na wyznaczenie temperatury Curie dla rdzenia transformatora.

2. Metoda przeprowadzania pomiarów i aparatura

Podczas pomiarów użyto następujących przyrządów i przedmiotów:

- Transformator z rdzeniem o kształcie kulistym
- Grzałka do kontroli temperatury rdzenia umieszczona w transformatorze

- Zasilacz podłączony do grzałki
- Generator funkcyjny podłączony do obwodu pierwotnego
- Miernik cyfrowy temperatury
- Voltomierz cyfrowy
- Komputer z oprogramowaniem sterującym grzałką i spisującym pomiary

Na początku ustawiono moc grzałki w programie na 70 procent. Zaczęła ona grzać rdzeń transformatora i zaczęto spisywać z programu temperaturę rdzenia i napięcie na obwodzie wtórnym. Spisywano pomiary co 5°C aż do osiągnięcia temperatury 135°C , gdzie zaczęto obserwować spadek napięcia. Od tego momentu spisywano pomiary co 1°C aż do osiągnięcia temperatury 205°C . Wtedy grzałkę wyłączono i rdzeń ochładzał się. Spisywano pomiary co 5°C dla ochładzającego się rdzenia, aż do osiągnięcia temperatury 60°C .

3. Wyniki pomiarów

W Tabeli 1, 2 i 3 przedstawiono wyniki pomiarów wraz z niepewnościami. Dyskusja metody obliczenia niepewności jest przeprowadzona w sekcji 3.2.

Ogrzewanie					Ogrzewanie				
Nr	T($^{\circ}\text{C}$)	U(V)	$u_T(^{\circ}\text{C})$	$u_U(\text{V})$	Nr	T($^{\circ}\text{C}$)	U(V)	$u_T(^{\circ}\text{C})$	$u_U(\text{V})$
1	21	0.4490	1	0.0045	19	110	0.4500	1	0.0045
2	25	0.4520	1	0.0045	20	115	0.4470	1	0.0044
3	30	0.4600	1	0.0046	21	120	0.4500	1	0.0045
4	35	0.4570	1	0.0045	22	125	0.4450	1	0.0044
5	40	0.4530	1	0.0045	23	130	0.4400	1	0.0044
6	45	0.4550	1	0.0045	24	135	0.4390	1	0.0044
7	50	0.4520	1	0.0045	25	136	0.4380	1	0.0044
8	55	0.4520	1	0.0045	26	137	0.4370	1	0.0044
9	60	0.4600	1	0.0046	27	138	0.4360	1	0.0044
10	65	0.4600	1	0.0046	28	139	0.4350	1	0.0043
11	70	0.4590	1	0.0046	29	140	0.4340	1	0.0043
12	75	0.4580	1	0.0045	30	141	0.4330	1	0.0043
13	80	0.4580	1	0.0045	31	142	0.4350	1	0.0043
14	85	0.4590	1	0.0046	32	143	0.4300	1	0.0043
15	90	0.4580	1	0.0045	33	144	0.4290	1	0.0043
16	95	0.4570	1	0.0045	34	145	0.4290	1	0.0043
17	100	0.4560	1	0.0045	35	146	0.4270	1	0.0043
18	105	0.4490	1	0.0045	36	147	0.4250	1	0.0043

Tabela 1: Wyniki pomiarów temperatury rdzenia i napięcia na obwodzie wtórnym wraz z niepewnościami dla ogrzewania rdzenia.

Ogrzewanie					Ogrzewanie				
Nr	T(°C)	U(V)	u_T (°C)	u_U (V)	Nr	T(°C)	U(V)	u_T (°C)	u_U (V)
37	148	0.4240	1	0.0042	66	177	0.2340	2	0.0026
38	149	0.4230	1	0.0042	67	178	0.2250	2	0.0025
39	150	0.4200	1	0.0042	68	179	0.2060	2	0.0024
40	151	0.4210	1	0.0042	69	180	0.1930	2	0.0022
41	152	0.4190	1	0.0042	70	181	0.1790	2	0.0021
42	153	0.4160	1	0.0042	71	182	0.1660	2	0.0020
43	154	0.4140	1	0.0042	72	183	0.1440	2	0.0018
44	155	0.4120	1	0.0041	73	184	0.1430	2	0.0018
45	156	0.4090	1	0.0041	74	185	0.1330	2	0.0017
46	157	0.4020	1	0.0041	75	186	0.1210	2	0.0016
47	158	0.3970	1	0.0040	76	187	0.1090	2	0.0015
48	159	0.3910	1	0.0040	77	188	0.1010	2	0.0015
49	160	0.3800	2	0.0039	78	189	0.0910	2	0.0014
50	161	0.3750	2	0.0038	79	190	0.0820	2	0.0013
51	162	0.3700	2	0.0038	80	191	0.0720	2	0.0012
52	163	0.3670	2	0.0038	81	192	0.0650	2	0.0011
53	164	0.3610	2	0.0037	82	193	0.0590	2	0.0011
54	165	0.3530	2	0.0036	83	194	0.0540	2	0.0010
55	166	0.3470	2	0.0036	84	195	0.0490	2	0.0010
56	167	0.3480	2	0.0036	85	196	0.0450	2	0.0010
57	168	0.3340	2	0.0035	86	197	0.0440	2	0.0010
58	169	0.3270	2	0.0034	87	198	0.0420	2	0.0009
59	170	0.3150	2	0.0033	88	199	0.0390	2	0.0009
60	171	0.3020	2	0.0032	89	200	0.0320	2	0.0009
61	172	0.2970	2	0.0031	90	201	0.0300	2	0.0008
62	173	0.2880	2	0.0031	91	202	0.0290	2	0.0008
63	174	0.2750	2	0.0030	92	203	0.0280	2	0.0008
64	175	0.2630	2	0.0029	93	204	0.0280	2	0.0008
65	176	0.2490	2	0.0027	94	205	0.0270	2	0.0008

Tabela 2: Wyniki pomiarów temperatury rdzenia i napięcia na obwodzie wtórnym wraz z niepewnościami dla ogrzewania rdzenia.

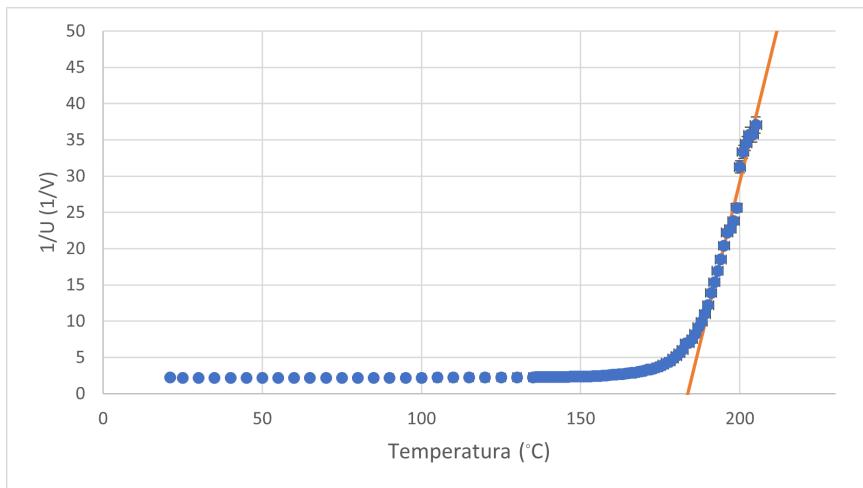
Chłodzenie				
Nr	T(°C)	U(V)	u _T (°C)	u _U (V)
95	200	0.0240	2	0.0008
96	195	0.0250	2	0.0008
97	190	0.0260	2	0.0008
98	185	0.0300	2	0.0008
99	180	0.0350	2	0.0009
100	175	0.0380	2	0.0009
101	170	0.0470	2	0.0010
102	165	0.0630	2	0.0011
103	160	0.0870	2	0.0013
104	155	0.1220	1	0.0016
105	150	0.1800	1	0.0021
106	145	0.2560	1	0.0028
107	140	0.3220	1	0.0034
108	135	0.3710	1	0.0038
109	130	0.4000	1	0.0040

Chłodzenie				
Nr	T(°C)	U(V)	u _T (°C)	u _U (V)
110	125	0.4160	1	0.0042
111	120	0.4260	1	0.0043
112	115	0.4350	1	0.0043
113	110	0.4400	1	0.0044
114	105	0.4420	1	0.0044
115	100	0.4460	1	0.0044
116	95	0.4480	1	0.0045
117	90	0.4470	1	0.0044
118	85	0.4490	1	0.0045
119	80	0.4480	1	0.0045
120	75	0.4480	1	0.0045
121	70	0.4470	1	0.0044
122	65	0.4470	1	0.0044
123	60	0.4490	1	0.0045

Tabela 3: Wyniki pomiarów temperatury rdzenia i napięcia na obwodzie wtórnym wraz z niepewnościami dla chłodzenia rdzenia.

3.1. Opracowanie wyników pomiaru

Na Rysunku 2 zaprezentowano zależność $\frac{1}{U}$ od temperatury T dla ogrzewania rdzenia na podstawie danych z Tabel 1 i 2.



Rysunek 2: Zależność $\frac{1}{U}$ od temperatury T podczas ogrzewania rdzenia. Niektóre słupki niepewności są zbyt małe aby były widoczne na wykresie. Zależność ta jest liniowa i zgodna z zależnością na Rysunku 1 dopiero gdy rdzeń przeszedł w stan paramagnetyczny. Graficznie wyznaczono że zależność jest liniowa od punktu gdzie $T=190^{\circ}\text{C}$ i dopasowano prostą używając funkcji Fit() w programie ROOT.

W Tabeli 4 przedstawiono wartości dla których dopasowano prostą na Rysunku 2. Dane są zaokrąglone w celu prezentacji. Wszystkie obliczenia dokonywane były na wartościach bezpośrednio otrzymywanych z kalkulacji.

T(°C)	1/U (1/V)	u_T (°C)	$u_{1/U}$ (1/V)
190	12.20	2	0.19
191	13.89	2	0.23
192	15.38	2	0.27
193	16.95	2	0.31
194	18.52	2	0.36
195	20.41	2	0.42
196	22.22	2	0.48
197	22.73	2	0.50
198	23.81	2	0.53
199	25.64	2	0.60
200	31.25	2	0.83
201	33.33	2	0.93
202	34.48	2	0.99
203	35.7	2	1.0
204	35.7	2	1.0
205	37	2	1

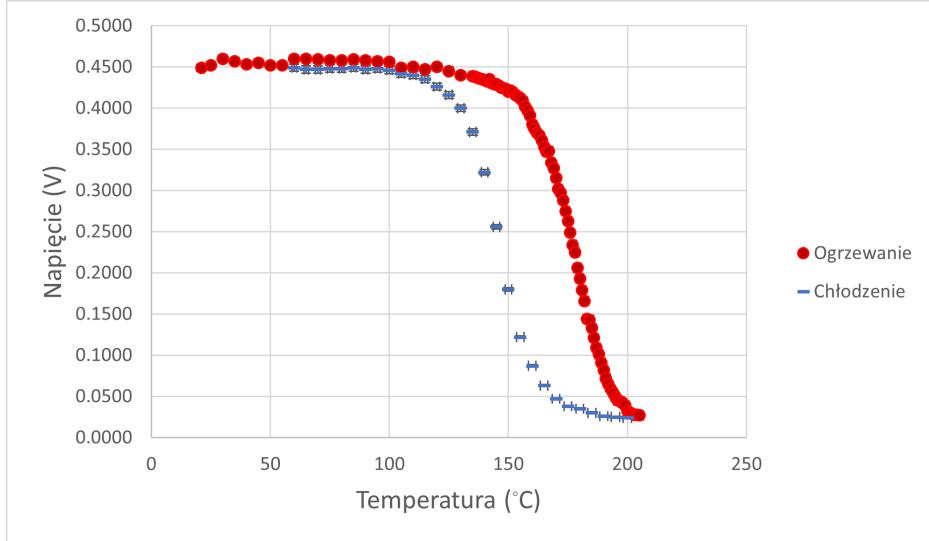
Tabela 4: Wartości dla których dopasowano prostą w programie ROOT z Rysunku 2.

Parametry dopasowanej prostej z Rysunku 2 wynoszą $a = 1.79$ (0.16) 1/K, $b = -328$ (32).

Po podstawieniu nie zaokrąglonych wartości parametrów a i b do wzoru (4) otrzymano wartość temperatury Curie $T_c = 184$ (24)°C.

Otrzymana wartość zamieniona na Kelwiny wynosi w przybliżeniu $T_c = 457$ (24) K. Jest to wartość bliska jednemu ze stopów Heuslera (Rh_2MnGe) dla którego wartość $T_c = 450$ K [3].

Na Rysunku 3 przedstawiono zależność napięcia od temperatury dla ogrzewania i chłodzenia rdzenia. Dane z Tabel 1, 2, 3.



Rysunek 3: Zależność napięcia na obwodzie wtórnym od temperatury rdzenia podczas jego ogrzewania i chłodzenia. Niektóre słupki niepewności są zbyt małe aby były widoczne na wykresie. Wraz ze wzrostem temperatury obserwowany jest spadek napięcia co oznacza burzenie ułożenia spinów w ferromagnetyku, aż do przejścia w stan paramagnetyczny gdzie następuje stabilizacja napięcia. Po wyłączeniu grzałki musi zajść wymiana energii pomiędzy spinami a siecią krystaliczną aby osiągnąć nowy stan równowagi energetycznej w odpowiedzi na pole magnetyczne tworzone przez uzwojenie pierwotne. W tym sensie układ 'pamięta' stan poprzedni i obserwowana jest pętla histerezy gdy rdzeń ochładza się. W transformatorze gdzie dochodzi do cyklicznej zmiany kierunku ułożenia domen magnetycznych pod wpływem zmieniającego się pola, duże pole histerezy jest niepożądane gdyż implikuje to większe straty energii na ponowne ułożenie domen.

3.2. Analiza niepewności

Niepewność temperatury obliczono ze wzoru:

$$u_T = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

gdzie ΔT to niepewność wzorcowania wynosząca $0.01T + 1^\circ$. T to zmierzona wartość temperatury. Niepewność napięcia obliczono ze wzoru:

$$u_U = \frac{\Delta U}{\sqrt{3}}, \quad (6)$$

gdzie ΔU to niepewność wzorcowania wynosząca $0.015U + 0.001$. U to zmierzona wartość napięcia. Nie przyjęto niepewności eksperymentatora ponieważ odczyty był proste i nie było wahań na wyświetlaczu. Niepewności wzorcowania zostały w takiej formie polecone przez prowadzącego ćwiczenie i bazują na dokumentacji mierników.

Niepewność wartości $f = \frac{1}{U}$ z Rysunku 2 została policzona z prawa propagacji niepewności:

$$u_{1/U} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial U}\right)^2 (u_U)^2} = \frac{1}{U^2} u_U. \quad (7)$$

Niepewność wartości $T_c = \frac{-b}{a}$ także została policzona z prawa propagacji niepewności:

$$u_{T_c} = \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 u_b^2 + \left(\frac{b}{a^2}\right)^2 u_a^2}, \quad (8)$$

gdzie a , b , u_a , u_b to parametry i ich niepewności dla dopasowanej prostej z Rysunku 2. Ich wartości zostały podane w sekcji 3.1.

Niepewności parametrów a i b dla prostej z Rysunku 2 uzyskano z wywołania funkcji Fit() w programie ROOT dla danych z Tabeli 4.

4. Podsumowanie i wnioski

Dokonano pomiarów napięcia na uzwojeniu wtórnym transformatora i temperatury jego rdzenia podczas grzania rdzenia i jego chłodzenia. Wyznaczono punkty gdzie zależność $\frac{1}{U}$ od temperatury T podczas ogrzewania rdzenia jest liniowa, dopasowano prostą funkcją Fit() w programie ROOT i uzyskano temperaturę Curie na przecięciu prostej z osią T równą $T_c = 184$ (24)°C. Otrzymana temperatura wskazuje że może być to stop Heuslera Rh₂MnGe dla którego $T_c = 450$ K (~ 177 °C). Rysunki 2 i 3 potwierdzają zgodność doświadczenia z teorią, a cel ćwiczenia, czyli wyznaczenie temperatury Curie dla rdzenia, został osiągnięty.

5. Bibliografia

- [1] Wydział Fizyki PW, Ćw. nr 20 - Badanie właściwości magnetycznych ciał stałych
- [2] W. Bogusz, J. Garbarczyk, F. Krok, Podstawy Fizyki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997
- [3] Wijn, H.P.J. (1991). Heusler alloys. In: Wijn, H.P.J. (eds) Magnetic Properties of Metals. Data in Science and Technology. Springer, Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-58218-9_7 [dostęp 05.19.2023]
- [4] Wydział Fizyki PW, Dr hab. Jacek Gosk, DODATEK DO ĆWICZENIA 20