

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

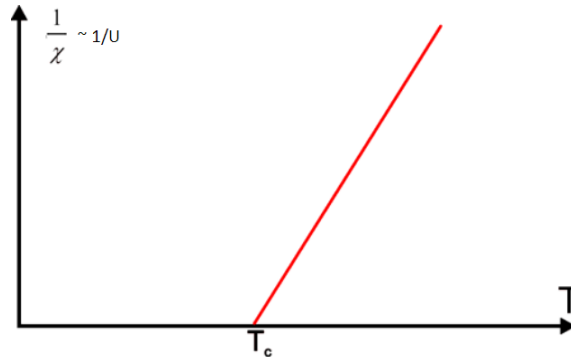
Celem ćwiczenia było wyznaczenie temperatury Curie i materiału wykonania rdzenia transformatora za pomocą pomiarów napięcia na uzwojeniu wtórnym w zależności od temperatury tego rdzenia.

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 oś 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
- Woltomierz 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 | | | | |
|------------|-------|--------|------------|-----------|
| Nr | T(°C) | U(V) | u_T (°C) | u_U (V) |
| 37 | 148 | 0.4240 | 1 | 0.0042 |
| 38 | 149 | 0.4230 | 1 | 0.0042 |
| 39 | 150 | 0.4200 | 1 | 0.0042 |
| 40 | 151 | 0.4210 | 1 | 0.0042 |
| 41 | 152 | 0.4190 | 1 | 0.0042 |
| 42 | 153 | 0.4160 | 1 | 0.0042 |
| 43 | 154 | 0.4140 | 1 | 0.0042 |
| 44 | 155 | 0.4120 | 1 | 0.0041 |
| 45 | 156 | 0.4090 | 1 | 0.0041 |
| 46 | 157 | 0.4020 | 1 | 0.0041 |
| 47 | 158 | 0.3970 | 1 | 0.0040 |
| 48 | 159 | 0.3910 | 1 | 0.0040 |
| 49 | 160 | 0.3800 | 2 | 0.0039 |
| 50 | 161 | 0.3750 | 2 | 0.0038 |
| 51 | 162 | 0.3700 | 2 | 0.0038 |
| 52 | 163 | 0.3670 | 2 | 0.0038 |
| 53 | 164 | 0.3610 | 2 | 0.0037 |
| 54 | 165 | 0.3530 | 2 | 0.0036 |
| 55 | 166 | 0.3470 | 2 | 0.0036 |
| 56 | 167 | 0.3480 | 2 | 0.0036 |
| 57 | 168 | 0.3340 | 2 | 0.0035 |
| 58 | 169 | 0.3270 | 2 | 0.0034 |
| 59 | 170 | 0.3150 | 2 | 0.0033 |
| 60 | 171 | 0.3020 | 2 | 0.0032 |
| 61 | 172 | 0.2970 | 2 | 0.0031 |
| 62 | 173 | 0.2880 | 2 | 0.0031 |
| 63 | 174 | 0.2750 | 2 | 0.0030 |
| 64 | 175 | 0.2630 | 2 | 0.0029 |
| 65 | 176 | 0.2490 | 2 | 0.0027 |

| Ogrzewanie | | | | |
|------------|-------|--------|------------|-----------|
| Nr | T(°C) | U(V) | u_T (°C) | u_U (V) |
| 66 | 177 | 0.2340 | 2 | 0.0026 |
| 67 | 178 | 0.2250 | 2 | 0.0025 |
| 68 | 179 | 0.2060 | 2 | 0.0024 |
| 69 | 180 | 0.1930 | 2 | 0.0022 |
| 70 | 181 | 0.1790 | 2 | 0.0021 |
| 71 | 182 | 0.1660 | 2 | 0.0020 |
| 72 | 183 | 0.1440 | 2 | 0.0018 |
| 73 | 184 | 0.1430 | 2 | 0.0018 |
| 74 | 185 | 0.1330 | 2 | 0.0017 |
| 75 | 186 | 0.1210 | 2 | 0.0016 |
| 76 | 187 | 0.1090 | 2 | 0.0015 |
| 77 | 188 | 0.1010 | 2 | 0.0015 |
| 78 | 189 | 0.0910 | 2 | 0.0014 |
| 79 | 190 | 0.0820 | 2 | 0.0013 |
| 80 | 191 | 0.0720 | 2 | 0.0012 |
| 81 | 192 | 0.0650 | 2 | 0.0011 |
| 82 | 193 | 0.0590 | 2 | 0.0011 |
| 83 | 194 | 0.0540 | 2 | 0.0010 |
| 84 | 195 | 0.0490 | 2 | 0.0010 |
| 85 | 196 | 0.0450 | 2 | 0.0010 |
| 86 | 197 | 0.0440 | 2 | 0.0010 |
| 87 | 198 | 0.0420 | 2 | 0.0009 |
| 88 | 199 | 0.0390 | 2 | 0.0009 |
| 89 | 200 | 0.0320 | 2 | 0.0009 |
| 90 | 201 | 0.0300 | 2 | 0.0008 |
| 91 | 202 | 0.0290 | 2 | 0.0008 |
| 92 | 203 | 0.0280 | 2 | 0.0008 |
| 93 | 204 | 0.0280 | 2 | 0.0008 |
| 94 | 205 | 0.0270 | 2 | 0.0008 |

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

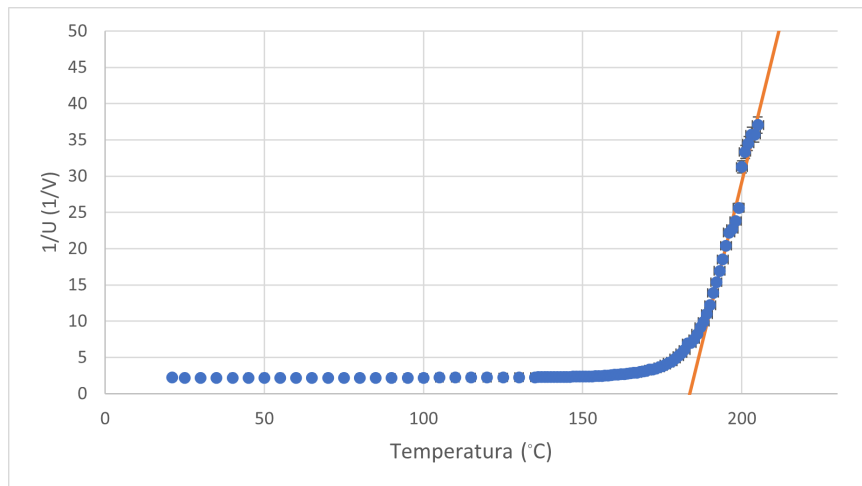
| Chłodzenie | | | | |
|------------|-------|--------|-------------------------|-----------------|
| Nr | T(°C) | U(V) | $u_T(^{\circ}\text{C})$ | $u_U(\text{V})$ |
| 95 | 200 | 0.0240 | 2 | 0.0008 |
| 96 | 195 | 0.0250 | 2 | 0.0008 |
| 97 | 190 | 0.0260 | 2 | 0.0008 |
| 98 | 185 | 0.0300 | 2 | 0.0008 |
| 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) | $u_T(^{\circ}\text{C})$ | $u_U(\text{V})$ |
| 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.

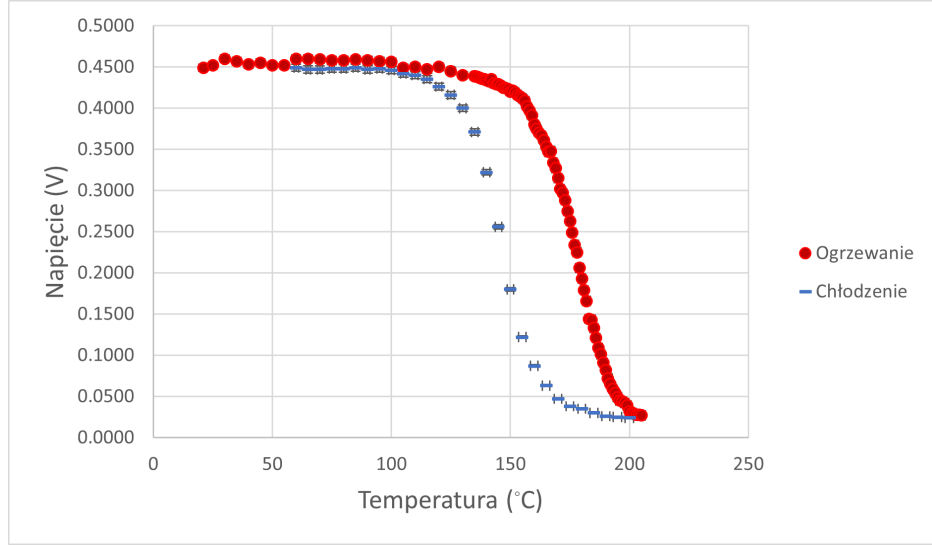
W Tabeli 4 przedstawiono wartości dla których dopasowano prostą na Rysunku 2. Dane są zaokrąglone w celu prezentacji. Wszystkie obliczenia dokonywane były na wartościach bezpośrednio otrzymywanych z kalkulacji.

| $T(^{\circ}\text{C})$ | $1/U \text{ (1/V)}$ | $u_T(^{\circ}\text{C})$ | $u_{1/U}(1/V)$ |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|----------------|
| 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 $a = 1.79 \text{ (0.16) } 1/\text{K}$, $b = -328 \text{ (32)}$. Po podstawieniu nie zaokrąglonych wartości parametrów a i b do wzoru (4) otrzymano wartość temperatury Curie $T_c = 184 \text{ (24)}^{\circ}\text{C}$. Otrzymana wartość zamieniona na Kelwiny wynosi w przybliżeniu $T_c = 457 \text{ (24) K}$. Jest to wartość bliska jednemu ze stopów Heuslera (Rh_2MnGe) dla którego wartość $T_c = 450 \text{ K}$ [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 były proste i nie było wahań na wyświetlaczu. Niepewności wzorcowania zostały w takiej formie polecane 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 Rh_2MnGe dla którego $T_c = 450$ K ($\sim 177^\circ\text{C}$). 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