Rozszerzenie zmysłów poprzez komputer – pomiary termiczne, optyczne i elektryczne

Mario Gervasio, Marisa Michelini, Rossana Viola

Research Unit in Physics Education, University of Udine, Italy

Streszczenie: Przesłanki użycia komputera w szkolnym laboratorium są rozliczne, poczynając od uwarunkowań społecznych współczesnego świata po powody aparaturowe. Przedstawiono przykłady zastosowania komputera w trzech gałęziach fizyki: 1. czteropunktowy pomiar temperatury w funkcji czasu, 2. pomiar natężenia światła w funkcji położenia w zjawisku dyfrakcji i 3. pomiar oporu elektrycznego nadprzewodników w funkcji temperatury za pomocą metody czterech punktów. Pomiary przeprowadzane były za pomocą sondy konstrukcji Uniwersytetu w Udine.

Expanding our senses by computer – thermal, optical and electrical measurements

Abstract: The reasons to use the computer in school laboratories are discussed, starting from social demand and ending on technical advantages. Three examples of the use of computer at school experiments are shown – variations of temperature vs. time by four point gauge, measurements of the light intensity vs. position in a diffraction experiment, dependence of resistance in superconductors vs. temperature. Measurements were done with the use of a system constructed at the University of Udine.

1. Znaczenie czujników on-line w szkolnym laboratorium

Społeczne, metodologiczno-dyscyplinarne i praktyczne powody przemawiają za użyciem komputerów w szkolnym laboratorium, gdyż:

- Nasze życie codzienne jest całkowicie skomputeryzowane, staje się zatem ważne ze społecznego punktu widzenia przygotowanie studentów do korzystania z metod i narzędzi technologii informacyjnej.
- W laboratoriach naukowych komputery zarządzają danymi i są nierozłączną (integralną) częścią badań naukowych. Eksperymenty on-line pozwalają studentom poznać metody badawcze fizyki.
- Na poziomie praktycznym, doświadczenia on-line oferują skuteczność, wydajność, oszczędność czasu, niezawodność, precyzję i powtarzalność wyników pomiarów. Co więcej, pozwalają one natychmiastowo i bezpośrednio zapoznać się z przebiegiem zjawiska fizycznego dzięki następującym możliwościom:
  - obserwacja zdarzeń o wiele szybszych i wolniejszych niż pozwala na to mierzenie ręczne
  - pomiary w niedostępnych miejscach
  - łatwiejsze gromadzenie danych, pozwalające na porównanie wyników na diagramach i wykresach, poszukiwanie charakterystyk i różnych informacji o analizowanych systemach (np. energetycznych)
  - badanie procesów nieliniowych dzięki szybkiemu pobieraniu danych; jest to niemożliwe w tradycyjnym laboratorium, gdzie pomiary wykonuje się w początkowym i końcowym stanie równowagi; pozwala to na porównanie danych doświadczalnych i modeli teoretycznych.

Powyższe możliwości czynią przeprowadzanie doświadczeń w szkole bliższymi rzeczywistości, a przez to bardziej interesującymi i stymulującymi. Doświadczenia on-line pozwalają na:

– oszczędność czasu i dobrą powtarzalność pomiarów, przez co jest możliwe skupienie uwagi na uzyskiwanych wynikach i na planowaniu eksperymentu

– gromadzenie dużej ilości danych pozwalające na użycie metod statystycznych

– skupienie uwagę na pojęciowym aspekcie procedury pomiaru, tj. ustawieniu i kalibracji systemu, wybieraniu czasu pomiaru, czułości, rozdzielczości itp.

– śledzenie w czasie rzeczywistym ewolucji zjawiska, co pobudza uczniów do szukania interpretacji oraz wspólnej dyskusji

– zastosowanie funkcji kontroli eksperymentu, co pozwala na poznanie takich pojęć, jak sprzężenie zwrotne, stabilność, nieliniowość; pojęcia te są wprowadzeniem do automatyzacji procesów.

Oczywiście, doświadczenia on-line nie mogą i nie muszą być jedynym tylko sposobem przeprowadzania doświadczeń laboratoryjnych.

2. Czujniki USB jako propozycja rozszerzenia zmysłów

Skutecznie dydaktycznie pomiary on-line w laboratoriach szkolnych, szczególnie na niższym poziomie nauczania (12–16 lat), wymagają używania prostych systemów, składających się z czujników połączonych bezpośrednio do komputera za pomocą portu USB. Zazwyczaj oprogramowanie oferuje kilka opcji i użytkownik może dokonać np. kalibracji czujnika, włączyć pomiar, zarządzać plikami, ustawiać czas próbkowania, wybierać liczbę użytych czujników, ustalać skale wykresów itd. Przedstawimy teraz 3 przykłady systemów do pomiarów zjawisk termicznych, optycznych i elektrycznych.

3. Pomiary temperatury w czasie rzeczywistym za pomocą układu TERMOCRONO

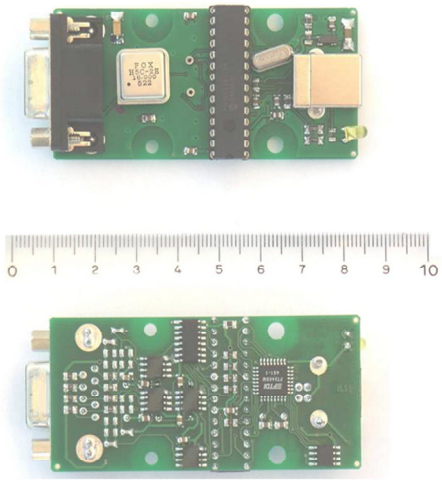
Termocrono to układ on-line umożliwiający pomiary temperatury w czasie rzeczywistym za pomocą czterech czujników. Pozwala on na śledzenie nie tylko stanów ustalonych ale i procesów termodynamicznych. Podłączenie do komputera zrealizowane jest za pomocą portu USB. System pomiarowy składa się z części sprzętowej i programu.

Część sprzętowa zawiera układ do zbierania danych oraz układ konwersji analogowo-cyfrowej. Pomiar temperatury jest oparty na mierzeniu wstecznego prądu nasycenia diody germanowej spolaryzowanej zaporowo. Opór diody germanowej spolaryzowanej zaporowo zależy silnie od temperatury. Konwersja jest typu prądowo-czasowego i wykorzystuje dokładność komputerowego oscylatora kwarcowego.

Prąd płynący przez każdą z diod (z tego samego zasilania komputera) ładuje kondensator podłączony do komparatora napięcia, który reaguje na zadaną minimalną i maksymalną wartość napięcia. Generator monostabilny wytwarza falę prostokątną, począwszy od momentu, w którym została zarejestrowana zadana minimalna wartość napięcia, aż do momentu, w którym zarejestrowano maksymalną wartość napięcia. W ten sposób czas, przez jaki jest generowana fala, zależy od czasu ładowania się kondensatora, ten zaś od oporu diody w momencie pomiaru (zgodnie ze wzorem na stałą czasową $\tau = RC$).

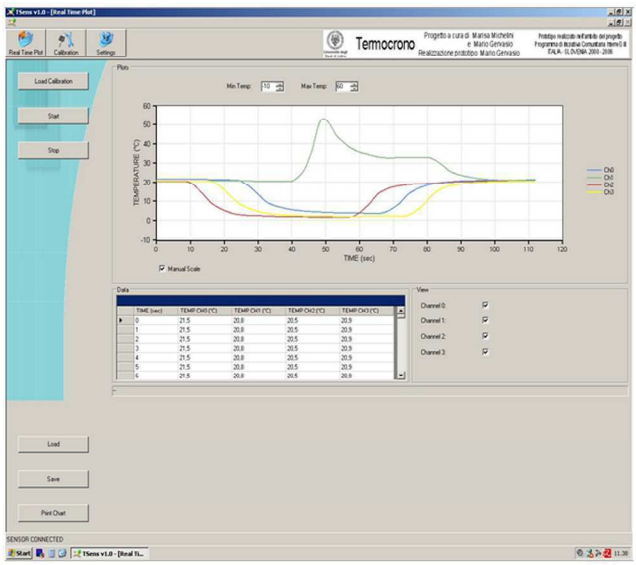
Czas trwania fali prostokątnej jest mierzony za pomocą oscylatora kwarcowego (16 MHz) – zliczana jest liczba impulsów fali. Liczba ta zależy bezpośrednio od temperatury diody. Licznik impulsów jest 32-bitowy; 22-gi bit (tj. 4 194 303 zliczeń) przerywa pomiar: powyżej tej wartości czujnik może pracować niepoprawnie. Karta interfejsu, używająca mikrokontrolera 18F252 firmy Microchip Technology, jest użyta do czytania w tym samym czasie czterech zliczeń z czterech niezależnych czujników. Zliczenia są przesyłane do komputera przez port USB przy użyciu dekodującego modułu FT245BM.

Rysunek 1 pokazuje układ znajdujący się w małym pudełku (9 cm × 4 cm × 1,5 cm). Diodowe czujniki temperaturowe są połączone do czterech kabli bipolarnych (o długości 2 m), które są podłączone do pudełka przez jeden tylko łącznik. Cztery czujniki mogą być użyte także niezależnie.



Rys. 1. Układ do wykrywania sygnałów i konwerter analogowo-cyfrowy nabyty przez Termocrono

Rysunek 2 pokazuje interfejs użytkownika: umożliwia on wizualizację w tym samym czasie wykresu danych z jednego lub wszystkich czujników. Skala wykresów może być dynamiczna lub zadana. Specyficzna funkcja układu pozwala na kalibrację przez porównanie z innym termometrem w minimalnej (2) i maksymalnej (15) liczbie termicznie równowagowych stanów. Wartości temperatury są wyznaczane przez układ poprzez dopasowanie pomiędzy punktami kalibracji, przy zastosowaniu regresji nieliniowej.



Rys. 2. Interfejs użytkownika oprogramowania układu Termocrono

Zakres pomiarowy układu wynosi $[-10°C, +100°C]$, czułość: 0,1°C, dokładność pomiaru: ±0,3°C. Każda grupa

czujników wymaga kalibracji przed użyciem. Kalibracja jest stabilna dla tej samej grupy sprzętu komputerowego. Funkcja programu „Real Time Plot" uruchamia pomiar. Pomiar jest dokonywany co sekundę i na ekranie komputera pojawia się wykres w czasie rzeczywistym. Wykresy i tabelki mogą być zapisywane na dysku, aby można je ponownie wczytać do badania i/lub wydrukować. Format zapisu tabelek z danymi jest zgodny z każdym arkuszem kalkulacyjnym. Układ może współpracować z każdym komputerem posiadającym port USB.

3.1. Przykłady pomiarów

Układ pomiarowy Termocrono dzięki swojej prostocie i elastyczności [Michelini i Stefanel, 2004; Michelini i Pighin, 2005] proponowany jest jako rozszerzenie zmysłów dla doświadczalnego badania zjawisk przyrodniczych przez młodszych uczniów lub nawet przedszkolaków. Dzięki czułości, dokładności i szybkości pobierania danych, pozwala doświadczalnie badać procesy dynamiczne. Pozwala on także na badanie stanów przejściowych i nietrwałych, takich jak impulsy i fale termiczne [Mazzera 1996]. Poniżej zaprezentowano kilka przykładów pomiarów, istotnych z różnych powodów dla zrozumienia znaczenia pomiaru temperatury i zerowej zasady termodynamiki.

A) Dwa czujniki znajdują się na stole; student bierze w ręce pierwszy z nich, następnie oba i w końcu ponownie kładzie jeden czujnik na stół.

To doświadczenie uświadamia studentowi, że:

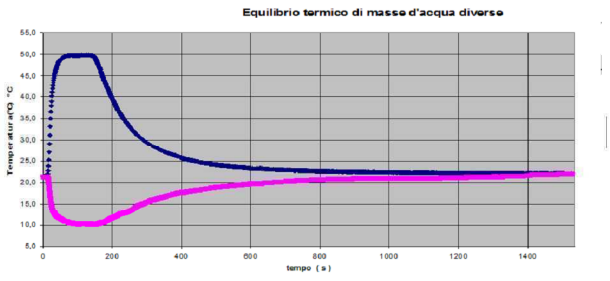
– stół i jego ręce są dwoma układami o różnych i stałych temperaturach,

– czujnik mierzy swoją temperaturę,

– informację o temperaturze otrzymuje się tylko wtedy, kiedy czujnik i układ są w równowadze termicznej,

– różnica długości czasu trwania faz ogrzewania i oziębiania czujnika jest spowodowana przez różne efektywności sprzężenia termicznego.

B) Na rysunku 3 pokazano zmiany w czasie temperatury dwóch mas wody (m_1 = 300 g w T_1 = 10,2°C i m_2 = 150 g w T_2 = 49,8°C). Układ jest złożony z pojemnika zawierającego wodę o masie m_1 i włożonego do drugiego pojemnika, z wodą o masie m_2 . Dwa układy dążą do wspólnej temperatury równowagowej, tj. średniej ważonej temperatur początkowych, gdzie wagą statystyczną są masy tych ciał (prawo równowagi termicznej Fouriera). Końcową temperaturą stanu równowagi jest 24,1°C, co pozwala obliczyć równoważne masy pojemników („równoważne" masie wody).

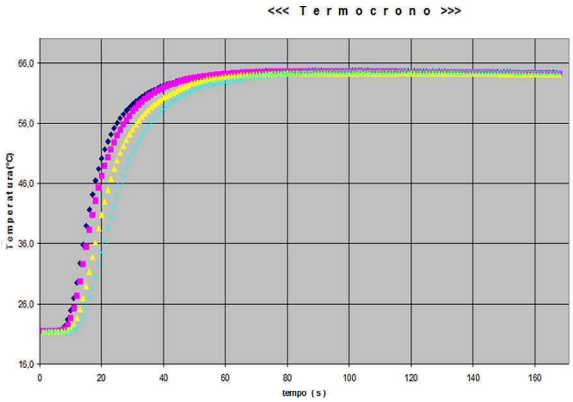


Rys. 3. Ewolucja w czasie temperatury dwóch mas wody: 300 g i 150 g o temperaturze początkowej odpowiednio 10,2°C i 49,8°C

C) Czujniki leżą na stole (w temperaturze pokojowej) i są przykryte foliami z różnych materiałów (np. folią metalową, folią plastikową, kartonem); student kładzie rękę na czujniku i czeka na stan równowagi termicznej.

To doświadczenie uświadamia studentowi, że czujniki osiągają taką samą temperaturę, ale w różnym czasie, który zależy od grubości folii i jej przewodności cieplnej.

D) Rysunek 4 pokazuje dane otrzymane, kiedy cztery czujniki są pokryte różnymi masami aluminium (0, 2, 4 i 10 g) oraz zostały włożone w dużą masę ciepłej wody (proces izotermiczny).



Rys. 4. Ewolucja w czasie temperatury 4 czujników z różnymi masami w wielkiej ilości ciepłej wody

Zależność uzyskania równowagi masy aluminium od czasu pozwala zrozumieć znaczenie pojęcia czasu odpowiedzi systemu oraz go obliczyć, Możliwe jest badania wykładniczej zależności zmian temperatury w trakcie osiągania równowagi termicznej.

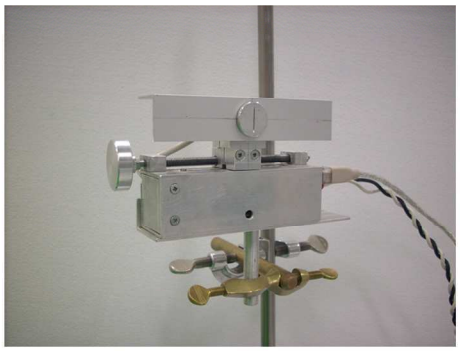
4. Prosty układ do eksperymentów dyfrakcyjnych: Lucegrafo

Przedstawiamy poniżej opis sprzętu komputerowego i oprogramowania dla prostych, domowych układów pomiaru on-line natężenia światła w funkcji położenia.

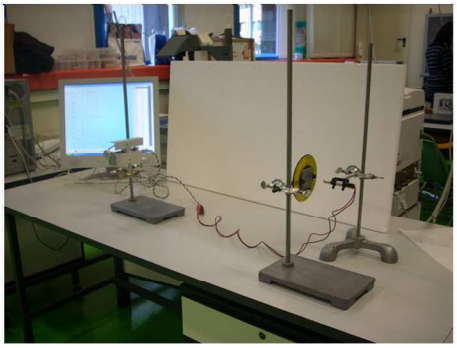
Wyposażenie zestawu doświadczalnego jest elementarne: komercyjny potencjometr liniowy ze znacznikiem, fototranzystor, pudełko montażowe, kabel USB.

Rysunek 5 pokazuje fototranzystor włożony w aluminiową obudowę razem z suwakiem potencjometru tak, aby sygnał optyczny był skorelowany z położeniem poprzez opór potencjometru. Mały prostokątny ekran (12 cm × 2 cm), umieszczony na wspólnym postumencie pozwala na jakościową ocenę rozkładu natężenia światła. W centrum ekranu jest otwór (o powierzchni 1 mm^2) pełniący rolę diafragmy dla sensora optycznego. Dodatkowo możliwe

jest zamontowanie regulacji położenia za pomocą śruby mikrometrycznej. Oba czujniki (potencjometru i fototranzystora) są połączone do procesora komputera przez port USB. Kalibracja systemu jest wykonywana przez pomiar intensywności światła w funkcji odległości od punktowego źródła. Eksperymentalna zależność intensywności światła od kwadratu odległości jest zarówno potwierdzeniem założonej funkcji transferu jak i sposobem na znalezienie nieznanych parametrów układu.



Rys. 5. Układ Lucegrafo



Rys. 6. Aparat do pomiarów

Układ posiada 3 przedziały czułości tak, aby zmierzyć natężenie maksimów dyfrakcyjnych aż do 12-tego maksimum oraz maksimum centralne; pomiaru dokonujemy w odległości 2 m od pojedynczego otworu o średnicy 0,1 mm, przy użyciu lasera o długości fali $\lambda \approx 650$ Å.

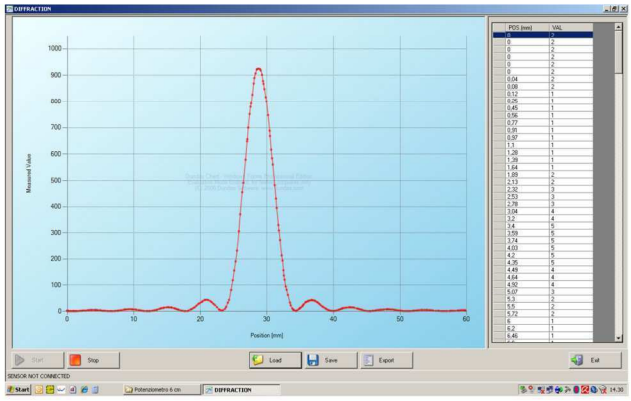
Oprogramowanie:

Podczas pomiaru układ zbiera i przedstawia na ekranie pary wartości (I, x) (natężenie światła, położenie), zarówno w formie graficznej i numerycznej, Pomiary dokonywane są co 1 s, tak więc przesuwając kursor liniowo otrzymuje się w ciągu 10 minut przestrzenny rozkład natężenia światła na długości 60 cm. Pomiar ten jest przedstawiany w postaci zależności liniowej: natężenie na wykresie jest przedstawione w arbitralnie wybranych jednostkach, proporcjonalnych do natężenia światła oddziałującego na czujnik.

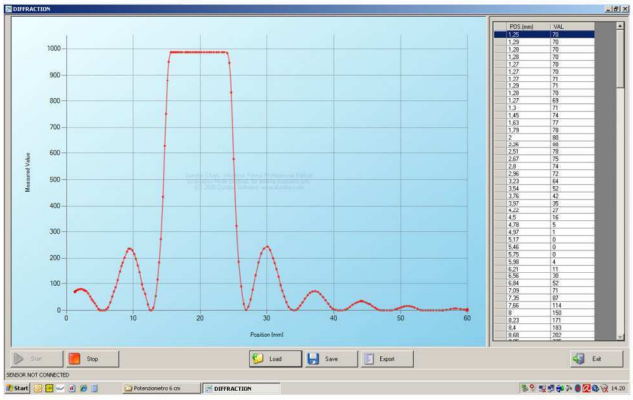
Poniżej przedstawiono kilka przykładów ćwiczeń, niemożliwych do przeprowadzenia w tradycyjnych laboratoriach dydaktycznych bez czujników komputerowych.

A) Badanie rozkładu natężenia światła w obrazie dyfrakcji.

Jakościowe badanie obrazu dyfrakcji na ekranie przy zmianie odległości D pomiędzy szczeliną a ekranem: ekran przechwytuje stały kątowy rozkład natężenia światła tak, że odległości minimów i maksimów od centralnego maksimum wzrastają proporcjonalnie do odległości D. Układ ten nie może przedstawić w tej samej skali natężenia zarówno centralnego maksimum jak i tych leżących w pobliżu, chyba że natężenie wejściowe zostanie zredukowane (porównaj rys. 7 i rys. 8). Daje to możliwość dyskusji zarówno charakterystyk obrazu dyfrakcji jak i działania czujników optycznych.



Rys. 7. Obraz dyfrakcji z układem w zakresie minimum czułości



Rys. 8. Obraz dyfrakcji z układem w zakresie maksimum czułości

B) Analiza wysokości maksimum

Prawo dyfrakcji w przybliżeniu Fraunhofera dla natężenia światła I_M w maksimum rzędu $M > 0$ w odniesieniu do natężenia maksimum centralnego I_0:

$$\frac{I_M}{I_0} = \frac{4}{\pi^2(2M+1)^2}$$

wyraża proporcjonalność pomiędzy szczytowym pikiem a odwrotnością kwadratu odległości od centralnego maksimum na ekranie.

I tak, przez wprowadzenie przybliżonej zależności dla położenia maksimum:

$$\frac{X_M - X_0}{D} = (2M+1)\frac{\lambda}{2a}$$

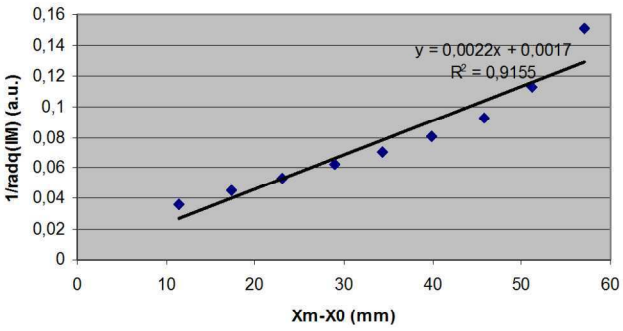
równanie poprzednie może być zapisane prościej:

$$\frac{I_M}{I_0} = \left(\frac{D\lambda}{\pi a}\right)^2 \frac{1}{(X_M - X_0)^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{I_M}} = \left(\frac{\pi a}{D\lambda}\right)\frac{1}{\sqrt{I_0}}(X_M - X_0)$$

Wykreślając $1/\sqrt{I_M}$ w zależności od $X_M - X_0$ otrzymuje się, w przybliżeniu, linię prostą (rys. 9).

MAX POSITION	I_M INTENSITY	X_M-X_0	1/radq(Im)
48,54	771	11,46	0,036014
42,59	489	17,41	0,045222
36,95	346	23,05	0,05376
31,07	261	28,93	0,061898
25,58	201	34,42	0,070535
20,19	153	39,81	0,080845
14,24	116	45,76	0,092848
8,92	79	51,08	0,112509
3	44	57	0,150756



Rys. 9. Odwrotność pierwiastka kwadratowego natężenia maksimum jako funkcja jego odległości od maksimum głównego. Przypadek dla szczeliny 12 μm i odległości ekranu D = 1,4 m.

Natężenie maksimum głównego może zostać obliczone z kąta nachylenia prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych, korzystając z natężenia pozostałych maksimów.

5. Pomiar oporu nadprzewodników w funkcji temperatury

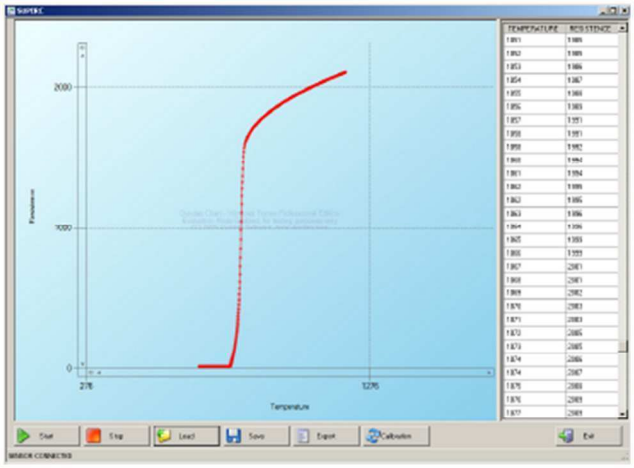
Rozwiązania elektroniczne dla pomiarów:

Opór próbki jest mierzony w czterech punktach nadprzewodnika leżących na linii prostej, za pomocą pomiaru napięcia pomiędzy dwoma wewnętrznymi punktami, przy natężeniu prądu przepływającego (między punktami zewnętrznymi) 100 mA.

Ustaloną stałą wartość prądu otrzymuje się przez podanie stałego napięcia odniesienia za pomocą diody Zenera w obwodzie z dwoma wzmacniaczami operacyjnymi umożliwiającymi pomiar napięcia na próbce (pomiędzy dwoma wewnętrznymi punktami styczności) do poziomu oporu rzędu milioma. Napięcie kontaktowe na stykach można pominąć, ponieważ wyjściowe napięcie odniesienia może być ustalone poprzez układ pomiarowy; minimalizujemy w ten sposób prąd wejściowy wzmacniacza operacyjnego. Zakres wzmocnienia wynosi od 5 (otwarcie obwodu) do 1000. Drugi wzmacniacz gwarantuje mierzone wartości rzędu mV. Pomiar temperatury jest prowadzony przez platynowy opornik PT100 (R = 100 Ω w 0°C) o rozdzielczości 0,4 Ω/°C. 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC) wystarcza do pomiaru temperatury w zakresie roboczym z dokładnością lepszą od 0,1°C.

Pozyskiwanie danych i oprogramowanie interfejsu:

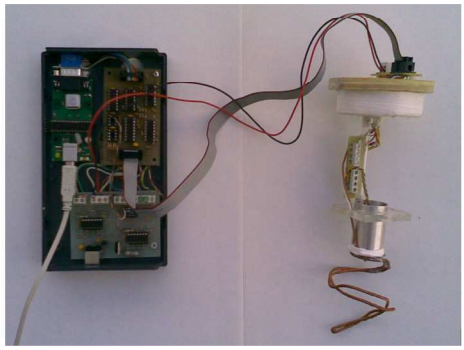
Pomiary temperatury i oporności właściwej są przeprowadzane przy użyciu 12-bitowego przetwornika ADC oraz programowalnego multipleksera PIC 18F252 firmy Microchip Technology. Dane są dostarczane przez USB przy użyciu modułu dekodera. Interfejs (rys. 10) jest bardzo prosty i przyjazny. Wykresy są generowane na ekranie w czasie rzeczywistym.



Rys. 10. Interfejs użytkownika

Skrzynka pomiarowa

Rysunek 11 przedstawia układ pomiarowy. Cylindryczne pudełko A1 stanowi przestrzeń grzewczą. Pręt



Rys. 11. Układ pomiarowy oporu nadprzewodników

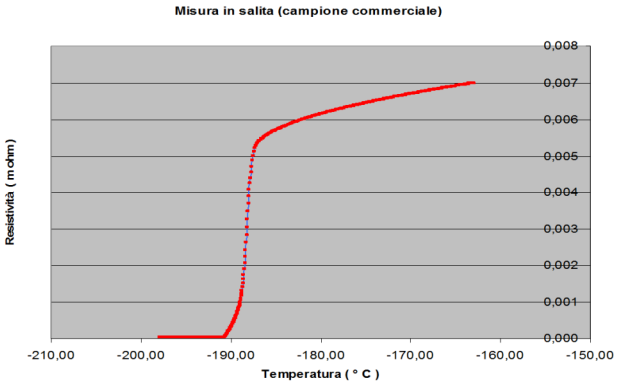
miedziany pojemnika zostaje umieszczony w ciekłym azocie. Grzejnik składa się z dwóch oporników 100 Ω (1 watt) w układzie równoległym, umieszczonych na podstawie pojemnika A1. Wzrost temperatury jest regulowany via software za pomocą potencjometru typu helipot podłączonego do tranzystora mocy stabilizującego prąd grzejnika. Pomiary oporu przeprowadza się na rampie zmian temperatury.

Układ testujący

Czujnik temperatury jest połączony z próbką w pudełku A1 a przewody są zebrane w przykrywce termosu zawierającego ciekły azot.

Testowanie danych

Na rysunku 12 pokazano otrzymywanie danych na rampie zmian temperatury 0,02°C/s.



Rys. 12. Otrzymywanie danych z komercyjnej próbki nadprzewodnika grzanej z prędkością 0,02°C na sekundę

Literatura

[1] M. Michelini, „L'elaboratore nel laboratorio didattico di fisica: nuove opportunità per l'apprendimento", *Giornale di Fisica* **XXXIII**, 4, 1992, p. 269.

[2] E. Mazzega, M. Michelini, „Termograjb: un sistema per misure di temperatura on-line nel laboratorio didattico", *La Fisica nella Scuola* **XXII**, 4, 1990, p. 38.

[3] D. Girardini, A. Sconza, E. Mazzega. M. Michelini, „Studio della conduzione del calore con l'utilizzo del computer on-line", *La Fisica nella Scuola* **XXIV**, 2, 1991, p. 71.

[4] E. Mazzega, M. Michelini, „On-line measurements of thermal conduction in solids: an experiments for high school and undergraduate students", *Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials, GIREP-ICPE Book, Forum 1996*.

[5] E. Mazzega, M. Michelini, „Termografo: a computer on-line acquisition system for physics education, *Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials, GIREP-ICPE Book, Forum 1996*, p. 239; M. Gervasio, M. Michelini, „TERMOCRONO. Un semplice sistema economico e flessibile per misure di temperatura in tempo reale", *Didamatica 2006 Atti*, red. A. Andronico, F. Aymerich, G. Fenu, AICA, Cagliari 2006, p. 522.

[6] V. Mascellani, E. Mazzega, M. Michelini, „Nuove opportunità di apprendimento in ottica mediante l'uso dell'elaboratore", *La Fisica nella Scuola* **XXII**, suppl. 4, 4, 1989, p. 48.

[7] V. Mascellani, E. Mazzega, M. Michelini, „Un sistema per esperienze di ottica on-line e indicazioni per attività didattiche nello studio della dffiazione ottica", *La Fisica nella Scuola* **XXV**, (Speciale congiunto AIF-SIF), 1992, p. l32.

[8] F. Corni, V. Mascellani, E. Mazzega, M. Michelini, G. Ottaviani, „A simple on-line system employed in experiments", *Light and Information, GIREP Abstract Book*, red. L.C. Pereira, J.A. Ferreira, H.A. Lopes, Univ. do Minho, Braga 1993.

[9] A. Frisina, M. Michelini, „Physical optics with on-line measurements of light intensity, *Teaching the Science of Condensed Matter and New Materials, GIREP-ICPE Book, Forum 1996*, p. 162.

Tłumaczenie: dr Przemysław Miszta