



Chronograf cyfrowy – pomoce dydaktyczne nie muszą być kosztowne

*Dominik Bejma**

Politechnika Gdańska,

Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej

Mądrość jest córką doświadczenia.

Leonardo da Vinci

Rola doświadczenia w dydaktyce nauk przyrodniczych

Dydaktyka nauk przyrodniczych, nieważne czy na poziomie akademickim, czy też na poziomie szkoły podstawowej, powinna różnić się od dydaktyki innych przedmiotów jedną charakterystyczną cechą: dążeniem do ukazania uczniowi, że informacje dotychczas zgromadzone przez pokolenia uczonych, a następnie spisane w książkach, nie wzięły się znikąd, lecz są opisem otaczającej nas rzeczywistości. Każdemu, kto zajmuje się nauczaniem fizyki, stwierdzenie, że wzory, zasady i prawa, z których korzystamy codziennie w szkole lub na uczelni mają swoje uzasadnienie w przyrodzie, z pewnością wyda się oczywistym. Jednak to co oczywiste dla nauczyciela, nie musi być oczywiste dla ucznia. Niestety, duże grono uczniów oraz studentów nie potrafi znaleźć żadnego powiązania między wzorami zawartymi w podręcznikach, a otaczającym ich światem materialnym. Fizyka jest przez wielu młodych ludzi postrzegana jako przedmiot niezrozumiały, a czasem nawet niemożliwy do zrozumienia. Bardzo często takie postrzeganie fizyki wynika z braku ukształtowania wyobraźni i intuicji, niezbędnych do rozumienia i także przewidywania przebiegu najróżniejszych procesów oraz zjawisk. Nawet napisane przez najwybitniejszych profesorów podręczniki nie są w stanie sprawić, by uczeń zrozumiał jakie mechanizmy rządzą jego otoczeniem. Do tego niezbędne jest doświadczenie, które kształtuje intuicję i pozwala na skonfrontowanie papierowej wiedzy z materialną rzeczywistością.

Niestety, aby podczas procesu dydaktycznego posiłkować się doświadczeniami, konieczne jest posiadanie stosownego sprzętu, który mówiąc bez ogródek, niejednokrotnie potrafi być absurdalnie drogi. Po przemianach w polskiej gospodarce i zastąpieniu systemu centralnie sterowanego przez system wolnorynkowy, wyposażenie pracowni fizycznej w nowy sprzęt stało się nagle wyjątkowo trudnym zadaniem. Problem ten dotyczy nie tylko Polski, lecz także innych krajów byłego bloku wschodniego. Jeżeli szkoły posiadają pracownie fizyczne, to zazwyczaj większość znajdujących się w nich sprzętów pamięta

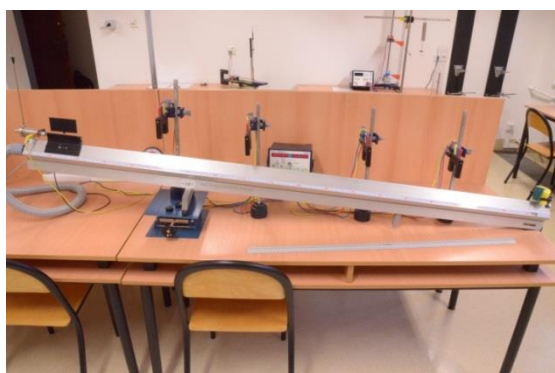
* bejma.dominik@gmail.com

jeszcze czasy, gdy nikt nawet nie spodziewał się upadku komunizmu. Nie trzeba chyba tłumaczyć, że pomimo wysokiej jakości wykonania i przemyślanej konstrukcji, liczba sprzętów, które po kilkudziesięciu latach wiernej służby wciąż są zdolne do pracy, systematycznie maleje. Ich naprawa wymaga wiedzy na temat dawno już niewykorzystywanych technologii oraz archaicznych części, które często nie są już produkowane. Dobrym sposobem na poprawienie stanu wyposażenia pracowni, wydaje się zakup nowych urządzeń i pomocy dydaktycznych, jednak często nie jest to możliwe ze względu na ograniczone środki. Czy jednak nabywanie instrumentów od firm sprzedających swoje produkty po bardzo wygórowanych cenach jest jedynym wyjściem?

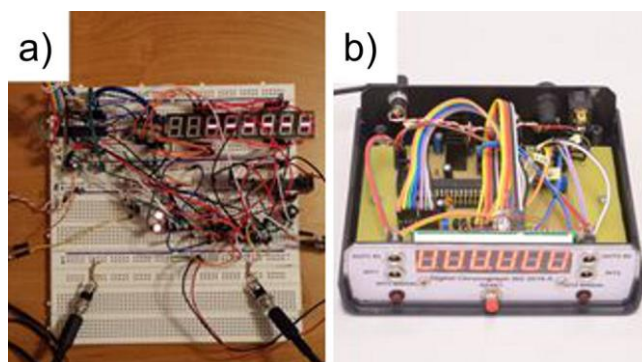
Chronograf cyfrowy

Spróbujmy odpowiedzieć na to pytanie, przyglądając się grupie doświadczeń, których wykonanie bez użycia odpowiednich przyrządów jest bardzo utrudnione, a mianowicie eksperymentom związanym z kinematyką. Pomiar czasu z wykorzystaniem stopera jest obciążony bardzo dużą niepewnością z powodu czasu reakcji eksperymentatora. Taki błąd można oszacować na ok. 0,3 s. Każdy, kto kiedykolwiek przeprowadzał w szkole czy w domu jakiekolwiek doświadczenie z kinematyki, doskonale wie, że w przypadku wykorzystania ręcznego stopera do tego typu doświadczeń, największy wkład do niepewności otrzymanego wyniku, praktycznie zawsze ma pomiar czasu. Problem ten można oczywiście rozwiązać, posiłkując się bardziej zaawansowaną techniką. Chronograf cyfrowy wyposażony w foto-bramki pozwala na mierzenie czasu z precyzją rzędu 1 ms. Najprostsza wersja tego typu urządzenia po zarejestrowaniu przejścia obiektu przez pierwszą foto-bramkę rozpoczyna pomiar czasu. Następnie pomiar zostaje zatrzymany w momencie przejścia obiektu przez drugą foto-bramkę, a użytkownik może odczytać wynik z wyświetlacza. Oczywiście znając odległość między foto-bramkami przyrządu, można z łatwością wyznaczyć prędkość średnią obiektu na tej trasie. Chronografy zazwyczaj są w stanie obsługiwać także inne czujniki. Przykładowo pomiar może być zainicjowany naciśnięciem przycisku lub zwolnieniem blokady np. przytrzymującej wózek na równi pochyłej (rys. 1). Chronografy dostępne na rynku zazwyczaj mieszczą się w przedziale cenowym od 300 zł do nawet 5000 zł w przypadku bardziej zaawansowanych, wielofunkcyjnych układów, pozwalających także na pomiar innych wielkości fizycznych oraz współpracujących z komputerem za pośrednictwem złącza RS232 lub USB. Jeśli nie jesteśmy zainteresowani tego typu „wodotryskami” i wolelibyśmy, aby przyrząd nie wykonał sam całego doświadczenia za ucznia/studenta, wówczas świetną alternatywą dla zakupu chronografu, może być samodzielne zbudowanie takiego urządzenia. Koszt części potrzebnych do konstrukcji instrumentu wynosi ok. 20–40 zł, jeśli zadowolą nas wersja na płytce prototypowej lub ok. 80 zł, gdy obiektem naszego pożądanego jest instrument polutowany na płytce drukowanej i zamknięty w obudowie

(rys. 2). Oczywiście nie zaryzykowałbym posądzenia o gołosłowność, więc dla potwierdzenia tezy, że można wyposażyć pracownię fizyczną w chronograf, nie sprowadzając przy tym na siebie gniewu pań z działu finansów, zbudowałem taki przyrząd, a następnie przeprowadziłem dwa doświadczenia z wykorzystaniem mojego urządzenia oraz dwóch profesjonalnych chronografów.



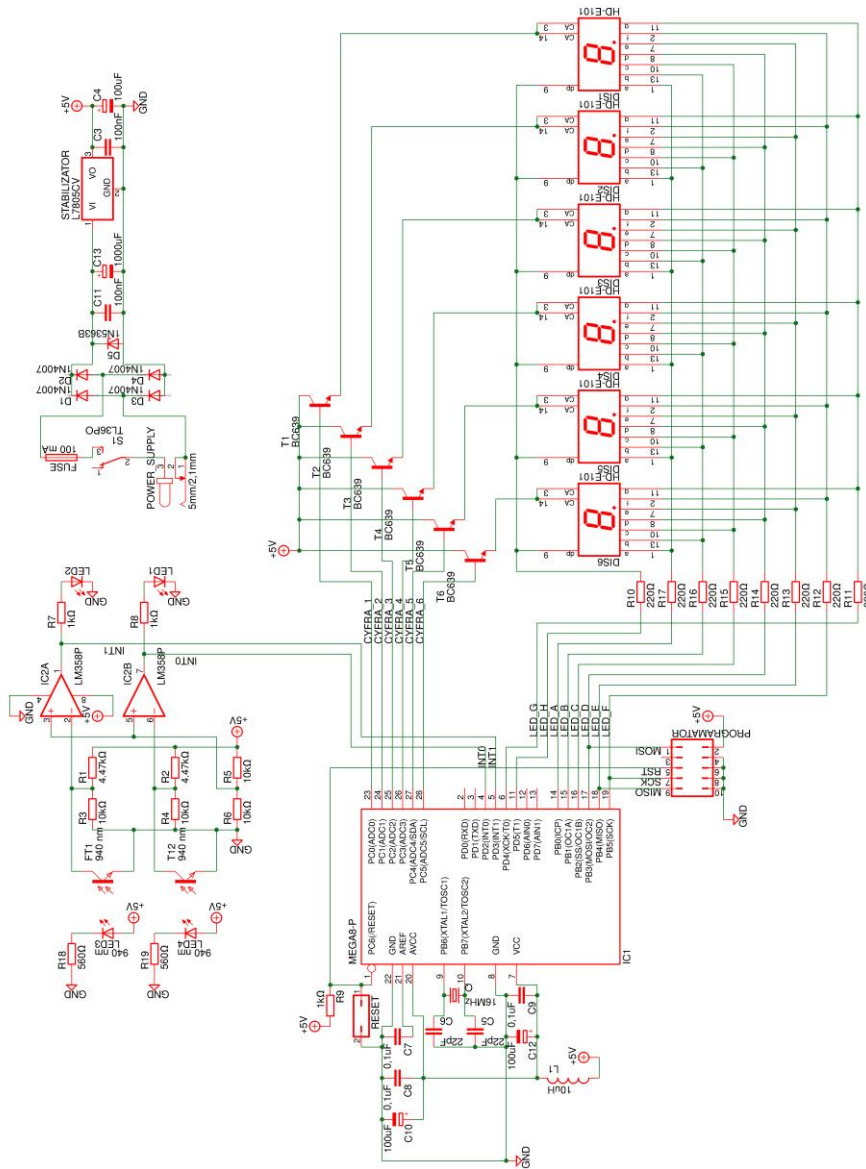
Rys. 1. Chronograf używany w Pracowni Wstępnej Mechaniki i Ciepła Politechniki Gdańskiej. Urządzenie posiada cztery liczniki. Pomiar wyzwalany jest zwolnieniem sprężyny przytrzymującej wagonik na początku toru powietrznego. Przejście wagonika przez każdą z foto-bramek zatrzymuje kolejne liczniki. Dzięki temu możliwe jest narysowanie wykresu położenia wózek od czasu



Rys. 2. Zbudowany przeze mnie chronograf: a) układ na płytce prototypowej, b) układ w obudowie, polutowany na płytce PCB

Budowa, programowanie oraz zasada działania chronografu

Zbudowany przeze mnie układ (rys. 3) oparty jest o odpowiednio oprogramowany mikrokontroler 8-bitowy ATmega8A-PU taktowany rezonatorem kwarcowym 16 MHz. Mikrokontroler dzięki rezonatorowi jest w stanie mierzyć upływ czasu z bardzo dużą dokładnością. Dokonuje tego zliczając drgania rezonatora. Zasada jest bardzo prosta.

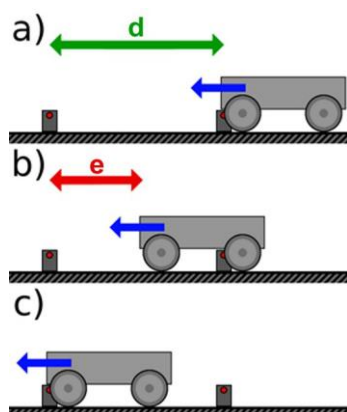


Rys. 3. Schemat układu elektronicznego chronografu

Skoro w ciągu sekundy rezonator wykonuje 16 000 000 oscylacji, więc po zarejestrowaniu 16 000 oscylacji, mikrokontroler stwierdza upływ jednej milisekundy i dodaje +1 do rejestru przechowującego liczbę milisekund, które upłynęły od momentu włączenia zasilania. Aby możliwa była rejestracja zdarzeń, niezbędne jest wykorzystanie tak zwanych przerwań, czyli funkcji, które jak sama nazwa wskazuje, powodują zatrzymanie wykonywania operacji w pętli głównej programu i są wykonywane „poza kolejną”, w momencie gdy zostanie spełniony stosowny warunek. W tym przypadku wykorzystane zostały przerwania zewnętrzne, wyzwalane przez podanie stanu niskiego na nóżki mikrokontrolera oznaczone INT0 i INT1. Układ realizuje następujący algorytm:

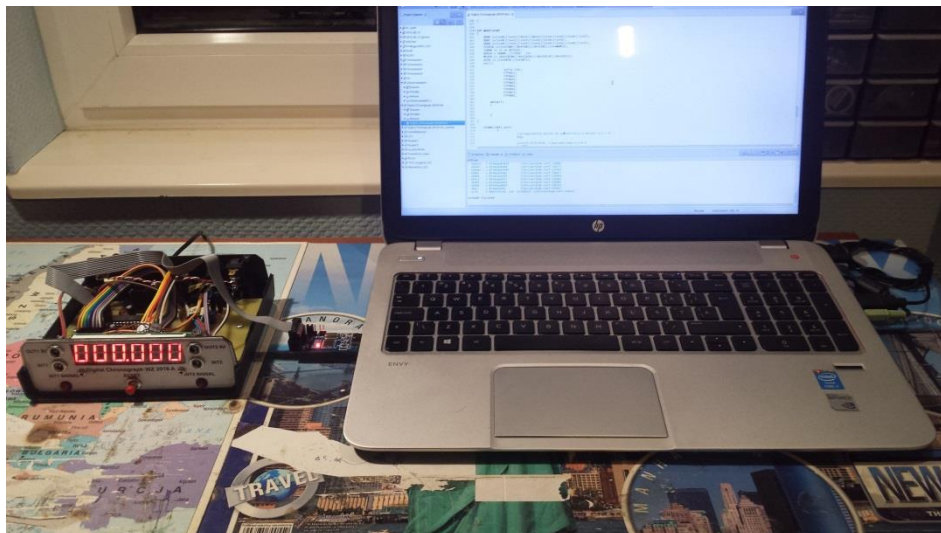
1. Włączenie zasilania;
 - a) Rozpoczęcie odliczania upływu kolejnych milisekund;
2. Przejście obiektu przez pierwszą foto-bramkę;
 - a) Wyzwolenie przerwania INT0;
 - b) Wyzerowanie licznika milisekund;
 - c) Dezaktywacja przerwania INT0 (przerwanie INT0 nie będzie mogło zostać ponownie wyzwolone aż do resetu układu);
 - d) Zakończenie przerwania INT0, powrót do głównej części algorytmu;
3. Przejście obiektu przez drugą foto-bramkę;
 - a) Wyzwolenie przerwania INT1;
 - b) Zapisanie licznika milisekund;
 - c) Przygotowanie wyniku do wyświetlenia w formacie sekund;
 - d) Przedstawienie wyniku w formacie sekund na wyświetlaczu;
4. Reset, powrót do punktu 1.

Szczególnie istotny jest krok 2.c), który chroni układ przed występowaniem błędów grubych, spowodowanych wielokrotnym przecięciem wiązki świetlnej w pierwszej foto-bramce (rys. 4). Przerwanie INT1 zawiera w sobie nieskończoną pętlę pozwalającą wyświetlić wynik na multipleksowanym, sześciocyfrowym wyświetlaczu LED. Pętlę tę przerywa tylko naciśnięcie przycisku RESET lub odcięcie zasilania.



Rys. 4. Błąd grubo pomiaru prędkości wynikający z niewłaściwego oprogramowania mikrokontrolera; a) jeśli układ działa poprawnie, pomiar czasu zostanie wyzwolony tylko raz, poprzez przecięcie wiązki świetlnej początkowej foto-bramki; b) jeśli pominiemy podpunkt [2.c)] algorytmu, każde kolejne przecięcie wiązki świetlnej początkowej foto-bramki rozpocznie nowy pomiar czasu; c) w konsekwencji chronograf nie będzie mierzył czasu jaki wózek potrzebuje na przebycie dystansu d , lecz na przebycie dystansu e

Zdecydowałem się, na wykorzystanie mikrokontrolera AVR ze względu na łatwość programowania oraz dużą ilość dostępnych w internecie kursów i przykładowych programów w C, co z pewnością zostanie docenione przez mniej doświadczonych elektroników. Seria ATmega jest bardzo rozpowszechniona wśród amatorów radiotechniki i robotyków. Ogromną zaletą tych mikrokontrolerów jest możliwość programowania ich za pomocą programatora USBasp przez interfejs SPI (ang. Serial Peripheral Interface Bus), w którego skład wchodzi tylko 6 sygnałów. Są to MOSI, MISO, SCK, RESET oraz VCC (zasilanie) i GND (masa). Dzięki interfejsowi SPI możliwe jest przeprogramowanie mikrokontrolera bez konieczności wymontowywania go z płytki PCB (ang. In System Programming – programowanie w układzie). Odbywa się to za pomocą złącza KANDA (rys. 3 – na schemacie: „PROGRAMATOR”). Wystarczy przyłączyć do złącza kabel programatora (rys. 5) i wgrać nowy program. Należałoby zatrzymać się w tym momencie na chwilę i wyjaśnić, czym właściwie jest programowanie mikrokontrolerów. Nie polega to bynajmniej na przekopiowaniu kodu programu napisanego w języku takim jak C czy Pascal do pamięci „scalaka”. Żaden mikrokontroler nie „zrozumiałby” tych wysokopoziomowych języków, których składnia opiera się na instrukcjach logicznych takich jak „while”, „if”, „for”. To, co wgrywamy do mikrokontrolera to tak zwany wsad, a owo wgrywanie odbywa się poprzez podawanie na piny interfejsu SPI na przemian stanów wysokich i niskich. Wizja zaprogramowania sekwencji jedynek i zer podawanych w odpowiedniej kolejności na nóżki MOSI, MISO, RESET i SCK słusznie wydaje się być misją samobójczą. Absolutnie nikt, w trosce o swój czas i zdrowie, nie postępuje w ten sposób (przynajmniej w dzisiejszych czasach). Stworzeniem stosownego ciągu sygnałów zajmują się kompilatory – programy tłumaczące języki programowania zrozumiałe dla człowieka (np. Fortran, Pascal, C) na kod maszynowy, czyli ciąg zer i jedynek. Programiście pozostaje jedynie zająć się funkcjonalnością algorytmu. Taką metodę nazywamy wysokopoziomym programowaniem mikrokontrolerów. Należałoby tu również wspomnieć o innym podejściu do zagadnienia, jakim jest programowanie niskopoziomowe, do którego wykorzystuje się język Asembler. Jest to o wiele trudniejsze, jednak programy napisane w ten sposób zajmują mniej pamięci i często działają o wiele szybciej, ponieważ są zbudowane od podstaw przez elektronika, a nie przetworzone przez kompilator, jak w przypadku programów pisanych w C. Istnieje kilka środowisk programistycznych i kompilatorów, pozwalających na programowanie mikrokontrolera AVR w języku C. Na końcu artykułu zawarłem listę stron internetowych, które z pewnością pozwolą zainteresowanym samemu nauczyć się programowania mikrokontrolerów AVR z serii ATmega w tym języku. Ja do tego celu używam środowiska Eclipse Neon.1 z pakietem WinAVR oraz The AVR Eclipse Plugin. Jest ono darmowe i sprawdza się zarówno pod systemami Windows jak i Linux. Czytelników, którzy chcieliby mieć wgląd w kod programu w C chronografu lub dowiedzieć się więcej na temat zastosowanych przez mnie rozwiązań, zapraszam do korespondencji.



Rys. 5. Programowanie mikrokontrolera na płytce PCB za pomocą interfejsu SPI. Koszt programatora USBasp to ok. 10–20 zł

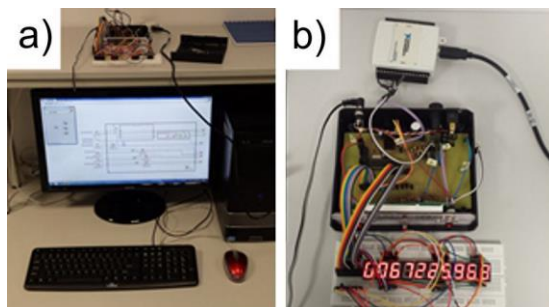
Cały układ polutowany jest na płytce PCB, wykonanej przeze mnie w domu metodą termotransferu i zamknięty w obudowie kupionej w sklepie z częściami elektronicznymi. Przed wykorzystaniem tej metody polecam poćwiczyć najpierw, przynajmniej kilka razy, np. przenosząc schemat ścieżek na kawałek blachy, pokrywkę puszki po ciasteczkach, czy jakkolwiek inny płaski, metalowy obiekt, aby nie zmarnować laminatu PCB. Pozwoli to zweryfikować czy grubość ścieżek nie jest zbyt mała i czy dobór drukarki oraz papieru jest właściwy. Ja wykorzystuję kartki z gazetek reklamowych albo gazet z programem telewizyjnym, ponieważ są drukowane na cienkim, kredowanym papierze. W internecie można znaleźć bardzo wiele wartościowych od strony merytorycznej poradników o projektowaniu i wytrawianiu płytek PCB przy użyciu dostępnego nieodpłatnie oprogramowania.

Testowanie instrumentu

W tym momencie byłoby zasadne postawienie pytania: „Jak dokładny jest pomiar czasu takiego chałupniczo wykonanego przyrządu? Skąd wiadomo, czy 1 sekunda zarejestrowana przez instrument jest równa 1 sekundzie zdefiniowanej jako czas równy 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma poziomami struktury nadsubtelnej stanu podstawowego atomu cezu ^{133}Cs ?”. Do uzyskania odpowiedzi na to pytanie konieczne jest porównanie sekundy „chałupniczej” z sekundą „urzędową”. Wystarczy jednocześnie wyzwolić pomiar czasu na urządzeniu, co do którego jesteśmy pewni, że odmierza czas z dużą precyzją oraz na chronografie, a następnie po kilkunastu

godzinach lub kilku dniach zatrzymać pomiar w tym samym momencie na obu przyrządach i porównać wyniki. Im dłużej trwa taki test porównawczy, tym mniejszy wpływ ma opóźnienie przy wyzwalaniu i zatrzymywaniu pomiaru (chciałoby się tu rzec: czymże jest ułamek sekundy wobec kilkudziesięciu godzin).

Aby mieć pewność, że mój instrument mierzy czas precyzyjnie, zbudowałem specjalne stanowisko oparte o kartę pomiarową National Instruments i program w środowisku LabView (rys. 6). Układ jednocześnie wyzwala przerwanie INTO w chronografie oraz pobiera informację o aktualnym czasie z serwera NTP zegara atomowego UMK w Toruniu. Dla tego połączenia internetowego czas od wysłania zapytania do otrzymania odpowiedzi z serwera, wynosi jedynie ok. 2–5 ms. Zakończenie pomiaru powoduje wyzwolenie przerwania INT1 w chronografie i – identycznie jak poprzednio – pobranie informacji o aktualnym czasie.

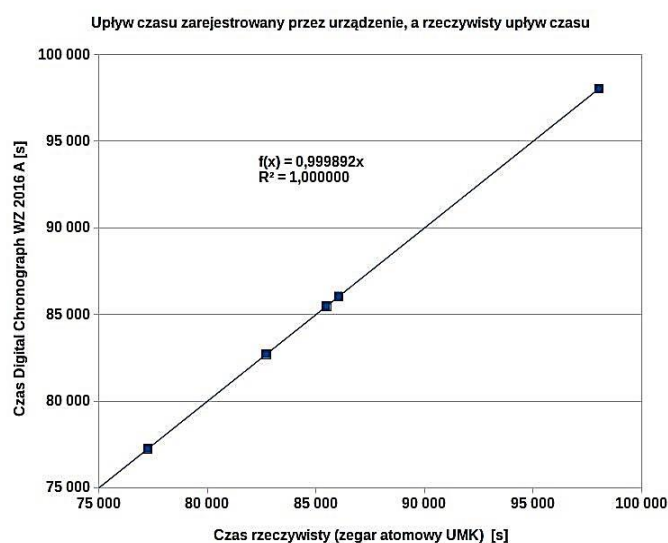


Rys. 6. Stanowisko pomiarowe; a) chronograf może być obsługiwany z poziomu komputera PC za pośrednictwem karty pomiarowej National Instruments; b) piny RESET, INTO i INT1 mikrokontrolera zostały podłączone do karty pomiarowej. Aby możliwe było mierzenie długich czasów, chronograf został wyposażony w zewnętrzny wyświetlacz LED na 10 cyfr

Czas chronografu [s]	Czas rzeczywisty [s] (zegar atomowy UMK)	Różnica procentowa
85 472,308	85 481,501	-0,010754%
86 045,806	86 055,054	-0,010747%
82 709,688	82 718,594	-0,010767%
77 248,223	77 256,538	-0,010763%
98 033,638	98 044,189	-0,010761%

Wyniki pomiaru zostały przedstawione na wykresie 1. Jak widać, chronograf „spóźnia się” o ok. 0,011%, co oznacza, że częstotliwość rezonatora kwarcowego w rzeczywistości jest mniejsza niż 16 MHz i wynosi ok. 15,824 MHz. Zastanówmy się, jak bardzo taka różnica wpłynie na jakość pomiarów. Aby taka rozbieżność w ogóle mogła mieć jakiś wpływ na wyniki, mierzony czas musi być dłuższy niż 10 s. Wyświetlacz mieści sześć cyfr, a więc w normalnym trybie pracy możliwe jest dokonywanie pomiarów czasów krótszych niż 999,999 s

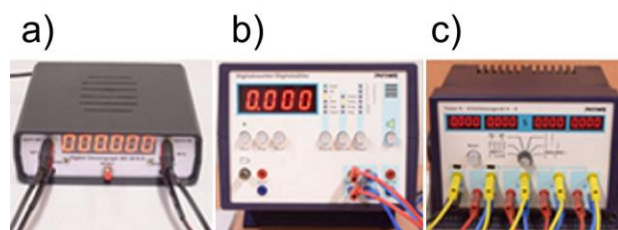
(czyli ok. 16,7 min). W przypadku tak długiego pomiaru błąd wyniesie zaledwie ok. 110 ms. Ponieważ chronometr spóźnia się stale w ten sam sposób, można do programu wprowadzić dodatkową linię, korygującą wynik, jednak nie jest to konieczne, gdyż najczęściej wykonywane są pomiary czasów krótszych niż 10 s, a więc taka korekta nie byłaby nawet zauważalna dla użytkownika.



Wykres 1. Upływ czasu zarejestrowany przez zbudowane przeze mnie urządzenie, a rzeczywisty upływ czasu

Doświadczenia z wykorzystaniem chronografów

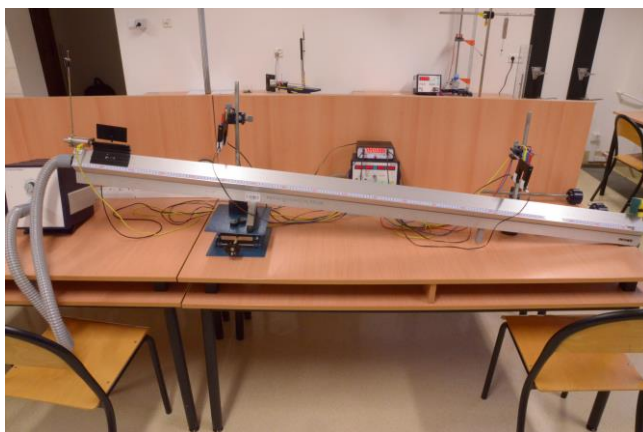
Aby udowodnić, że własnoręcznie wykonany chronograf jest zdolny stanąć w szranki z komercyjnym, wykonałem dwa doświadczenia, wykorzystując do nich kolejno: moje urządzenie oraz dwa wysokiej klasy chronografy wykorzystywane na Politechnice Gdańskiej w Pracowni Wstępnej Mechaniki i Ciepła (rys. 7).



Rys. 7. Chronografy wykorzystane w doświadczeniach; a) własnoręcznie wykonany przyrząd. (dalej nazywany „Chronograf A”); b) jednokanałowy licznik wielofunkcyjny firmy Phywe (dalej nazywany „Chronograf B”); c) czterokanałowy chronograf firmy Phywe (dalej nazywany „Chronograf C”)

Eksperyment nr 1: Ruch ciała na równi pochyłej

Dwie foto-bramki zostały ustawione nad torem powietrznym (rys. 8) tak, aby mogły rejestrować przejazd wagonika. Podczas doświadczenia nie została wykorzystana sprężynowa wyrzutnia zainstalowana na początku toru, lecz wagonik był wypuszczany ręcznie, tak aby nie miał prędkości początkowej. Dzięki obecności poduszki powietrznej, wagonik mógł się poruszać po nachylnym torze praktycznie bez oporów ruchu.



Rys. 8. Stanowisko pomiarowe nr 1

W takiej sytuacji jego przyspieszenie a wynosi:

$$a = g \sin\varphi \quad (1)$$

gdzie:

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – wartość przyspieszenia grawitacyjnego Ziemi,
 φ – kąt nachylenia toru.

Oznaczmy jako t_1 czas po jakim wypuszczony wagonik dotrze do pierwszej foto-bramki oraz jako t_2 czas po jakim dotrze on do drugiej foto-bramki. Wówczas zmierzony przez chronograf czas t będzie równy:

$$t = t_2 - t_1. \quad (2)$$

Oznaczmy jako x_1 odległość pierwszej foto-bramki od początkowego położenia wagonika oraz x_2 jako odległość pomiędzy foto-bramkami. Z równań ruchu jednostajnie przyspieszonego prostoliniowego wynika co następuje:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2x_1}{a}}, \quad t_2 = \sqrt{\frac{2(x_1 + x_2)}{a}} \quad (3)$$

$$a = \frac{4x_1 + 2x_2 - 4\sqrt{x_1(x_1 + x_2)}}{t^2}. \quad (4)$$

Celem doświadczenia było porównanie wartości a obliczonej z wzoru (1) na podstawie pomiaru kąta nachylenia toru oraz z wzoru (4) na podstawie pomiaru odległości x_1 , x_2 i czasu t .

Niepewność δa pomiarów pośrednich wynosi odpowiednio dla pierwszej metody:

$$\delta a = \left| \frac{\partial a}{\partial \varphi} \right| \delta \varphi \Leftrightarrow \delta a = g \cos(\varphi) \delta \varphi \quad (5)$$

oraz dla drugiej metody:

$$\delta a = \left| \frac{\partial a}{\partial x_1} \right| \delta x_1 + \left| \frac{\partial a}{\partial x_2} \right| \delta x_2 + \left| \frac{\partial a}{\partial t} \right| \delta t \quad (6)$$

$$\left| \frac{\partial a}{\partial x_1} \right| = \left| \frac{4}{t^2} - \frac{2(2x_1 + x_2)}{t^2 \sqrt{x_1(x_1 + x_2)}} \right|, \quad (7a)$$

$$\left| \frac{\partial a}{\partial x_2} \right| = \left| \frac{2}{t^2} - \frac{2x_1}{t^2 \sqrt{x_1(x_1 + x_2)}} \right|, \quad (7b)$$

$$\left| \frac{\partial a}{\partial t} \right| = \left| 4 \frac{2\sqrt{x_1(x_1 + x_2)} - 2x_1 - x_2}{t^3} \right|, \quad (7c)$$

gdzie:

$\delta \varphi$ – niepewność pomiaru kąta nachylenia toru,

$\delta x_1 = \delta x_2$ – niepewność pomiaru położenia foto-bramek,

δt – niepewność pomiaru czasu chronografami cyfrowymi.

Wyniki pomiarów:

$$\varphi = 7^\circ \pm 0,5^\circ; \quad x_1 = (0,200 \pm 0,005) \text{ m}; \quad x_2 = (1,000 \pm 0,005) \text{ m}$$

Pomiar	Chronograf A $\delta t = 0,003 \text{ s}$		Chronograf C $\delta t = 0,003 \text{ s}$	
	t [s]	a [m/s ²]	t [s]	a [m/s ²]
1.	0,848	1,168	0,846	1,174
2.	0,846	1,174	0,845	1,177
3.	0,848	1,168	0,847	1,171
4.	0,848	1,168	0,847	1,171
5.	0,849	1,165	0,849	1,165
6.	0,848	1,168	0,847	1,171

7.	0,847	1,171	0,846	1,174
8.	0,848	1,168	0,846	1,174
9.	0,848	1,168	0,847	1,171
10.	0,847	1,171	0,846	1,174
Średnia	0,8477	1,169	0,8466	1,172

Wartość a wyznaczona na podstawie kąta nachylenia toru:

$$a = (1,20 \pm 0,09) \text{ m/s}^2$$

Wartość a wyznaczona na podstawie pomiarów chronografem A:

$$a = (1,17 \pm 0,03) \text{ m/s}^2$$

Wartość a wyznaczona na podstawie pomiarów chronografem C:

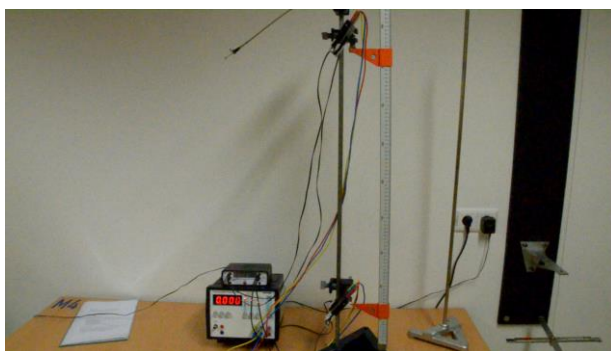
$$a = (1,17 \pm 0,03) \text{ m/s}^2$$

Wszystkie otrzymane wyniki pokrywają się. Oznacza to, że zarówno chronograf A jak i chronograf C bardzo dobrze realizują swoje zadanie.

Eksperyment nr 2: Spadek swobodny

Na statywie zostało umieszczone urządzenie zwalniające metalową kulkę oraz dwie foto-bramki mogące zarejestrować jej przelot (rys. 9). Dzięki zastosowaniu takiego spustu można mieć pewność, że kulka jest upuszczana za każdym razem z tej samej wysokości oraz że nie posiada prędkości początkowej. Jeśli analogicznie jak w poprzednim doświadczeniu oznaczymy jako y_1 odległość spustu od pierwszej foto-bramki, jako y_2 odległość między foto-bramkami oraz jako t czas przelotu kulki pomiędzy foto-bramkami otrzymamy:

$$g = \frac{4y_1 + 2y_2 - 4\sqrt{y_1(y_1 + y_2)}}{t^2}. \quad (8)$$



Rys. 9. Stanowisko pomiarowe nr 2

Celem doświadczenia było porównanie tablicowej wartości g oraz wyznaczonej ze wzoru (8) na podstawie pomiaru odległości y_1 , y_2 i czasu t .

Niepewność δg pomiaru pośredniego przyspieszenia ziemskiego wynosi:

$$\delta g = \left| \frac{\partial g}{\partial y_1} \right| \delta y_1 + \left| \frac{\partial g}{\partial y_2} \right| \delta y_2 + \left| \frac{\partial g}{\partial t} \right| \delta t \quad (9)$$

$$\left| \frac{\partial g}{\partial y_1} \right| = \left| \frac{4}{t^2} - \frac{2(2y_1 + y_2)}{t^2 \sqrt{y_1(y_1 + y_2)}} \right|, \quad (10a)$$

$$\left| \frac{\partial g}{\partial y_2} \right| = \left| \frac{2}{t^2} - \frac{2y_1}{t^2 \sqrt{y_1(y_1 + y_2)}} \right|, \quad (10b)$$

$$\left| \frac{\partial g}{\partial t} \right| = \left| 4 \frac{2\sqrt{y_1(y_1 + y_2)} - 2y_1 - y_2}{t^3} \right|, \quad (10c)$$

gdzie:

$\delta y_1 = \delta y_2$ – niepewność pomiaru położenia foto-bramek,

δt – niepewność pomiaru czasu chronografami cyfrowymi.

Wyniki pomiarów:

$$y_1 = (0,100 \pm 0,005) \text{ m}; \quad y_2 = (0,700 \pm 0,005) \text{ m}$$

Pomiar	Chronograf A $\delta t = 0,003 \text{ s}$		Chronograf B $\delta t = 0,003 \text{ s}$	
	$t \text{ [s]}$	$g \text{ [m/s}^2\text{]}$	$t \text{ [s]}$	$g \text{ [m/s}^2\text{]}$
1.	0,261	9,815	0,2554	10,250
2.	0,260	9,891	0,2560	10,202
3.	0,260	9,891	0,2557	10,226
4.	0,260	9,891	0,2554	10,250
5.	0,260	9,891	0,2552	10,267
6.	0,260	9,891	0,2560	10,202
7.	0,261	9,815	0,2552	10,267
8.	0,260	9,891	0,2556	10,234
9.	0,261	9,815	0,2555	10,242
10.	0,260	9,891	0,2555	10,242
Średnia	0,2603	9,8683	0,25555	10,2385

Wartość tablicowa:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Wartość g wyznaczona na podstawie pomiarów chronografem A:

$$g = (9,8 \pm 0,5) \text{ m/s}^2$$

Wartość g wyznaczona na podstawie pomiarów chronografem B:

$$g = (10,2 \pm 0,5) \text{ m/s}^2$$

Podobnie jak w poprzednim doświadczeniu, oba instrumenty pozwoliły na otrzymanie racjonalnych wyników, równych wartości tablicowej w granicach niepewności pomiarowych.

Podsumowanie

Wprost idealne do podsumowania tego artykułu wydają się dwie mądrości ludowe mówiące, że „potrzeba matką wynalazków” oraz „dla chcącego nic trudnego”. Jak wykazałem, możliwe jest skonstruowanie niskim kosztem własnego chronografu, pozwalającego na wykonanie ciekawych doświadczeń z kinematyki. Producenci pomocy naukowych prześcigają się w wymyślaniu coraz to bardziej złożonych układów o coraz szerszej funkcjonalności. Niewątpliwą zaletą takich produktów jest ich kompatybilność z różnymi zestawami pomiarowymi oraz duża wszechstronność, pozwalająca nie tylko na pomiar czasu, ale także częstotliwości, czy długości impulsu. Niektóre układy samodzielnie zapisują wyniki i wyliczają ich średnią lub są w stanie współpracować z komputerami PC. Jednak dydaktyka fizyki nie musi wiązać się z koniecznością zakupu drogiego, komercyjnego sprzętu.

W dzisiejszych czasach, gdy dzięki dobrodziejstwu Internetu, każdy ma dostęp do ogromnej ilości informacji, poradników, książek elektronicznych, filmów instruktażowych oraz specjalistycznych forów internetowych skupiających zarówno elektroników-amatorów, jak i inżynierów, jedynym ograniczeniem w zdobywaniu nowej wiedzy i umiejętności jest nasze lenistwo (i ewentualnie powolne łącze internetowe). Każdy pasjonat fizyki jest w stanie, bez wychodzenia z domu, nabyć wiedzę konieczną do tworzenia własnych przyrządów pomiarowych lub pomocy dydaktycznych.

Przydatne materiały

- Internetowy kurs programowania mikrokontrolerów AVR w języku C – <http://hobby.abxyz.bplaced.net/index.php?pid=4&aid=1>
- Mikrokontrolery – Jak zacząć? – <http://mikrokontrolery.blogspot.com/>
- Mirosław Kardaś – Blog poświęcony mikrokontrolerom AVR – <http://mirekk36.blogspot.com/>
- Kurs elektroniki analogowej – <http://ea.elportal.pl/wstep.html>
- Portal FORBOT – Kurs projektowania płytek PCB – <http://forbot.pl/blog/artykuly/podstawy/cadsoft-eagle-czesc-1-schematy-id1468>
- USBasp – USB programmer for Atmel AVR controllers – <http://www.fischl.de/usbasp/>

Bibliografia

Atmel ATmega8A Datasheet Complete – http://www.atmel.com/images/atmel-8159-8-bit-avr-microcontroller-atmega8a_datasheet.pdf