

Licznik ruchów wahadła

Piotr Jarzębowski Tymoteusz Kędzior Rafał Komar
Bartłomiej Leks Michał Łapiński

Praca wykonana pod opieką dr. hab. Krzysztofa Miernika

Streszczenie

Pomiar okresu drgań wahadła jest popularnym zadaniem na wstępnych pracowniach obejmujących zagadnienia fizyczne. Klasyczne liczenie *w głowie* jest podatne na pomyłki, co może utrudniać wykonanie ćwiczenia. Projekt ten ma na celu opisanie oraz budowę prostego w obsłudze licznika cykli wahadła mającego zautomatyzować ten proces. Skonstruowane zostały trzy konstrukcje licznika wykorzystujące kolejno optyczny czujnik transmisyjny, optyczny czujnik odbiciowy oraz czujnik ultradźwiękowy. Układy zostały przetestowane na wahadłach w pracowni, co pozwoliło na zweryfikowanie mocnych i słabych stron każdej konstrukcji. Ostatecznie wszystkie zostały zakwalifikowane do dalszych testów na pracowni.

1 Wstęp

Badanie okresu drgań wahadła jest popularnym zadaniem na wstępnych pracowniach obejmujących zagadnienia fizyczne. Zadanie to ma jednak na celu, głównie, zapoznanie studentów z metodami statystycznej analizy danych, a łączy się ono ze żmudnym, wielokrotnym mierzeniem okresów wahadła, potencjalnie negatywnie wpływając na odczucia studentów. Dodatkowo, manualne liczenie cykli, *w głowie* lub na liczniku ręcznym, wiąże się w błędami zliczeń poprzez niedopatrzenie lub błąd aparatury. Takie błędy w małych ilościach łatwo zidentyfikować w formie tzw. *outliers'ów* w serii pomiarów, ale przy małej ilości powtórzeń pomiaru lub często popełnianych błędów mogą prowadzić do znaczących problemów ze statystyczną analizą danych.

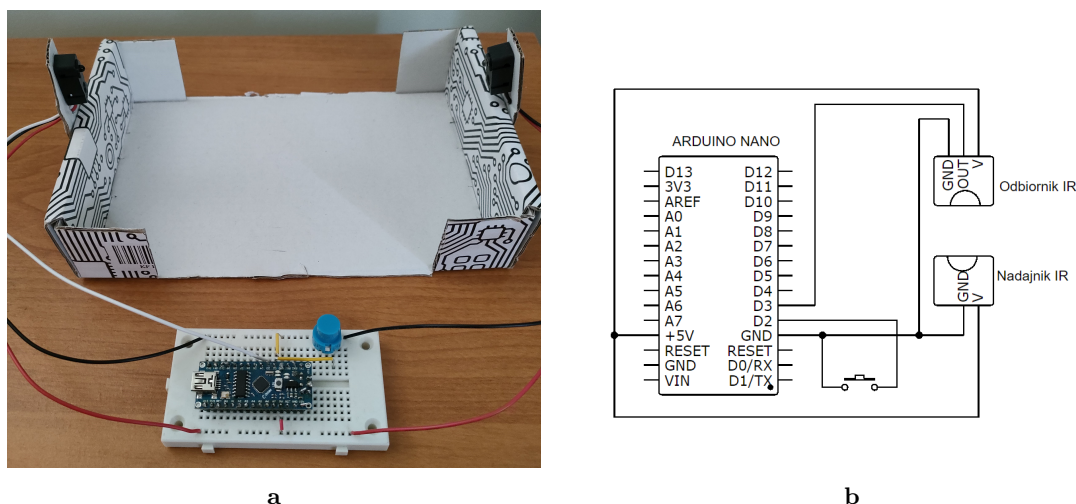
Naturalnym sposobem przeciwdziałania takim problemom jest zastosowanie automatycznych liczników cykli wahadła. Licznik taki musi charakteryzować się zdolnością wykrywania obiektu poruszającego się w jego okolicy bez ingerencji w jego tor czy działając na niego siłą mechaniczną. To dyskredytuje możliwe zastosowanie czujników bazujących na elementach mechanicznych wprowadzanych w ruch przez wahadło albo czujników opartych na elektromagnesach lub jakimkolwiek oddziaływaniu elektrostatycznym.

Optymalnym rozwiązaniem takiego problemu są, szeroko wykorzystywane w urządzeniach detekcyjnych, czujniki opierające się na falach elektromagnetycznych i akustycznych. Szczególnie interesujące dla nas są czujniki optyczne z zakresu bliskiej podczerwieni oraz czujnik ultradźwiękowy. Raport ten skupia się na trzech konstrukcjach urządzeń bazujących na takich czujnikach, porównując także różne tryby ich pracy w przypadku czujnika optycznego.

2 Architektury liczników

2.1 Optyczny czujnik transmisyjny

Wykorzystując optyczny czujnik transmisyjny zbudowano dwa działające urządzenia. W pierwszym użyto cyfrowego licznika *CD4026*, który wyświetlał liczbę zliczeń na 7-segmentowym wyświetlaczu. W drugim wykorzystano układ *Arduino Nano*. Zdjęcie oraz schemat takiego licznika przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1: Zdjęcie licznika zbudowanego z wykorzystaniem układu *Arduino Nano* oraz transmisyjnego czujnika optycznego (a) oraz schemat połączeń elementów w tym układzie (b).

W obu licznikach użyto czujnika przerwania wiązki IR *DNG-18689*. Składa się on z nadajnika i odbiornika. Nadajnik to dioda świecąca w podczerwieni o średnicy 3mm. Natomiast odbiornik to fototranzystor. Czujnik pracuje prawidłowo, jeżeli nadajnik i odbiornik są ustawione naprzeciwko siebie w odległości maksymalnie 50cm. Kąt świecenia diody to 10°. Oba elementy czujnika należy podłączyć do masy oraz napięcia 5V. Odbiornik ma dodatkowo wyjście cyfrowe. Gdy wiązka nie jest przerywana na wyjściu panuje stan wysoki, a w przeciwnym przypadku niski. To wyjście jest podłączone do Arduino, które zlicza liczbę przerwań wiązki, czyli zmianę stanu z wysokiego na niski. W tym celu sprawdza stan na odpowiednim wejściu i porównuje z poprzednim stanem. Jeżeli poprzedni stan jest wysoki, a aktualny niski to dodaje kolejne przerwanie wiązki. Ustawiając czujnik prostopadłe do ruchu wahadła, tak by kulka w najniższym położeniu przerywała wiązkę pozwala wyznaczyć liczbę półokresów drgań wahadła. Te dane są dalej przesyłane portem szeregowym do komputera.

Do układu dołączono również przycisk, który po wciśnięciu zatrzymuje dalsze liczenie drgań. Ponowne wciśnięcie przycisku powoduje rozpoczęcie liczenia od początku. Przycisk podłączono do masy oraz pinu cyfrowego Arduino. Na tym wejściu użyto funkcji `INPUT_PULLUP`, dzięki czemu nie wciskając przycisku utrzymywany jest tam stan wysoki.

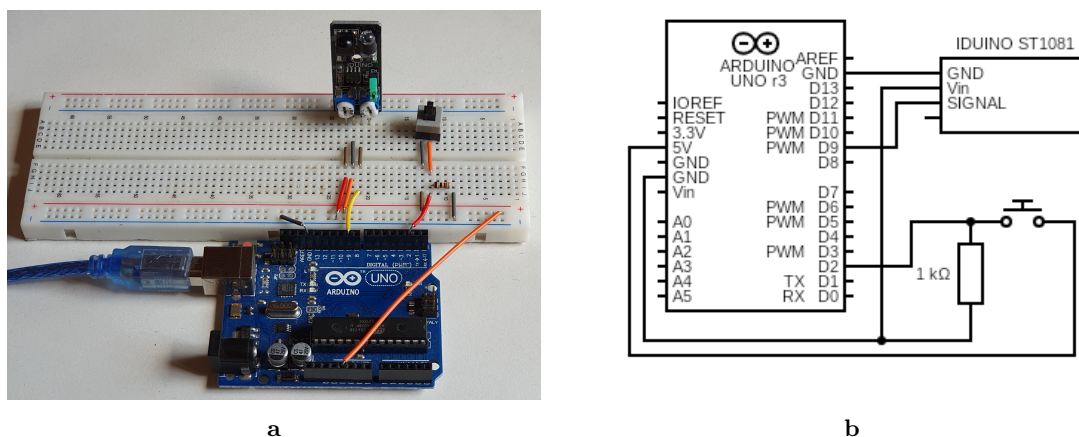
Główną zaletą wykorzystania optycznego czujnika transmisyjnego jest prosta budowa takiego licznika. Dodatkowo jest on bardzo łatwy w obsłudze, ponieważ nie wymaga kalibracji. By czujnik działał wystarczy ustawić go tak, żeby kulka wahadła w spoczynku znajdowała się pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem.

Natomiast największą wadą jest konieczność ustawienie nadajnika oraz odbiornika naprze-

ciwko siebie, co sprawia, że licznik musi być znacznie większy niż pozostałe konstrukcje. Kolejną wadą może być duża tolerancja na odchylenia w ruchu wahadła. Przez to użytkownik może nie zauważyć, że wahadło zaczyna poruszać się po elipsie, co może zaburzyć wyniki jego doświadczenia.

2.2 Optyczny czujnik odbiciowy

Drugą przetestowaną wersją urządzenia był licznik używający optycznego czujnika odbiciowego wraz z układem cyfrowym *Arduino Uno*. Zdjęcie gotowego układu oraz schemat jego połączeń zostały przedstawione na Rysunku 2.



Rysunek 2: Zdjęcie urządzenia zbudowanego z wykorzystaniem odbiciowego czujnika optycznego (a) oraz schemat połączeń elementów w układzie (b).

Moduł użyty w czujniku to *Iduino ST1081*. Jego głównymi elementami jest dioda podczerwona oraz czujnik podczerwieni. Gdy moduł zostanie uruchomiony, dioda okresowo wysyła sygnał świetlny o odpowiedniej częstotliwości. Jeśli fala elektromagnetyczna odbije się od wahadła znajdującego się w pobliżu modułu, to zostaje on zarejestrowany przez odbiornik na którego wyjściu pojawia się sygnał elektryczny. Zostaje on następnie przesłany do Arduino i ewentualnych urządzeń peryferyjnych — w prototypowej wersji dane te przesyłano portem szeregowym do komputera. Do układu dodano również przycisk, który po wciśnięciu umożliwia wyzerowanie czujnika w trakcie jego pracy. Został on podłączony do masy Arduino przez opornik 1 kΩ, aby utrzymać niski poziom wyjścia gdy przycisk nie jest używany.

Zgodnie ze specyfikacją, użyty moduł ma możliwość regulacji za pomocą dwóch potencjometrów umieszczonych na płytce drukowanej, widocznych również na Rysunku 2a. Autorzy nie podają jednak szczegółów użytkowania elementu — regulacja została wykonana metodą prób i błędów. Modyfikowanie kolejno obu potencjometrów pozwoliło na zwiększenie zakresu odbioru sygnału i wykrywania przeszkody (wahadła) do około 5 cm — jest to dalekie od wartości maksymalnej 40 cm którą podaje producent, ale wystarczające do celów badania wahadła.

Dodatkowo, w kodzie obsługującym miernik umieszczono dwa regulowane parametry: `BUFFER_SIZE` oraz `COUNT_DELAY`. Pierwszy z nich, `BUFFER_SIZE`, oznacza ilość sygnałów które muszą wystąpić pod rząd, aby program dokonał zliczenia. Przy zbyt dużych wielkościach parametru powoduje to opóźnienia w działaniu, ale przy wartościach `BUFFER_SIZE` ≈ 3 (domyślna wartość ustawiona w programie) pozwala znacząco uniknąć ewentualnych szumów i błędów, reje-

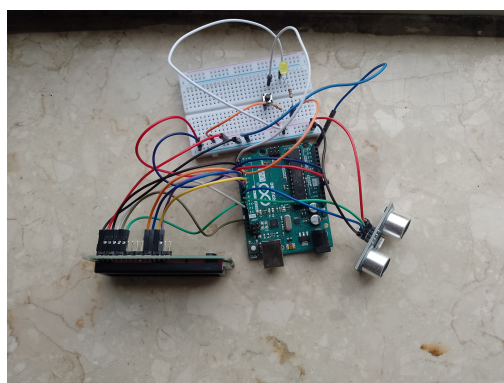
strując jedynie prawdziwy ruch wahadła. Parametr COUNT_DELAY pozwala na uniknięcie parokrotnego zliczania tego samego wahnięcia wahadła. Gdy czujnik wykryje ruch, program nie będzie miał możliwości rejestrowania kolejnego zliczenia przez czas ustawiony w parametrze (w milisekundach). Pozwoli to wahadłu zbliżyć się i oddalić od licznika bez powodowania błędów urządzenia. W domyślnej wersji programu wartość została ustawiona na COUNT_DELAY = 10ms.

Główną zaletą odbiciowego czujnika optycznego jest jego prostota — zarówno w budowie jak i w użytkowaniu. Jego niewielki rozmiar oraz umieszczenie nadajnika i odbiornika w jednym miejscu powoduje, że nie potrzeba do jego użytkowania dwuczęściowej obudowy służącej w czujniku transmisyjnym do umieszczenia elementów optycznych po przeciwnych stronach wahadła. Co więcej, czujnik nie wymaga od użytkownika kalibracji — w razie potrzeby jest ona możliwa za pomocą potencjometrów, jednak mały zasięg modułu powoduje że jest to zbędne. Czujnik pozwala na detekcję ruchu odpowiednio ustawionego wahadła, ale nie wykrywa innych obiektów znajdujących się w pobliżu.

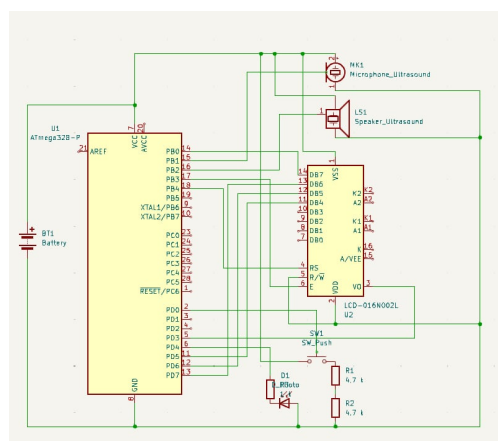
Z drugiej strony, główną wadą opisanego rozwiązania jest mały zasięg urządzenia. Tak jak wspomniano, pomaga on w problemie kalibracji, jednak jest to pewien kompromis. Przy większym zasięgu użytkownik musiałby dokonać kalibracji, jednak mógłby oszczędzić czas na braku potrzeby dokładnego ustawienia wahadła. Problemem urządzenia jest również mały obszar wykrywania przeszkód w kierunku poprzecznym. Działa ono jedynie jeśli przeszkoda jest umieszczona dokładnie nad miernikiem, w promieniu kilku centymetrów. Problem ten jest znacznie mniej widoczny w czujniku ultradźwiękowym ze względu na jego rozmiary, jak również w czujniku transmisyjnym, gdzie wahadło zostanie wykryte w dowolnym położeniu na prostej pomiędzy diodą a odbiornikiem.

2.3 Czujnik ultradźwiękowy

Kolejna konstrukcja zakładała wykorzystanie modułu czujnika ultradźwiękowego wraz z odpowiednim układem cyfrowym *Arduino Uno* do procesowania danych. Zdjęcie skonstruowanego układu zostało przedstawione na Rys. 3a, a schematyczny rysunek na Rys. 3b.



a



b

Rysunek 3: **a**, Zdjęcie skonstruowanego układu z wykorzystaniem modułu czujnika ultradźwiękowego. **b**, Schemat układu z liniami demonstrującymi połączenia przewodów między elementami układu.

Czujnik ultradźwięków dla układów Arduino wykorzystany w tym układzie bazuje na zasadzie generowania oraz odbicia fal w zakresie częstotliwości ultradźwięków od obiektów. W skonstruowanym układzie badane jest w jakiej odległości od czujnika zostały odbite ultradźwięki:

- gdy kuli nie ma w zasięgu czujnika, fale mogą odbić się tylko od obiektów będących daleko poza zasięgiem czujnika, dzięki czemu efektywnie nie otrzymujemy sygnału powracającego;
- gdy kula jest w zasięgu czujnika, fale odbijają się i wracają do czujnika, zwracając dane o czasie odbicia (równoważne odległości, w której nastąpiło odbicie) na wyjściu z modułu.

Zliczenie połowy cyklu wahadła następuje gdy kula znowu wchodzi w zasięg czujnika. Licznik ustawia wtedy stan obecności kuli i czeka aż ponownie wyjdzie ona z jego zakresu.

Aby uniknąć ewentualnych odbić pochodzących od obiektów zewnętrznych, kod wgrany na mikrokontroler Arduino zawiera wewnętrzne parametry *distance* oraz *up/bottom* (wszystkie w cm), który pozwala na selekcję tylko fal odbitych w odległościach w oknie: (*distance* – *bottom*, *distance* + *up*). Tuż po uruchomieniu urządzenia, wykonywany jest proces automatycznej kalibracji, w którym czujnik zwraca odległość do wiszącej nad nim kuli wahadła, zapisując parametr *distance*. Parametry *up/bottom* są ustawione jako stałe o wartościach odpowiednio: XXX cm i YYY cm.

Dla poprawnego funkcjonowania układu, kluczowe było także ustawienie parametru częstotliwości szczytowania (repetycji) z czujnika. Przy zbyt wysokiej częstotliwości repetycji, możliwe było, że czujnik podwójnie zmierzy obecność kuli w badanym zakresie, zakłócając poprawność wyniku liczby zliczeń. Dlatego częstotliwość repetycji została ustawiona jako stała o wartości XXX ms.

Zastosowanie to zostało wykorzystane jako alternatywa dla czujników optycznych, gdyż fale akustyczne, o prędkościach w powietrzu znacznie niższych od światła, umożliwiają badanie czasu po jakim odbite fale wracają do czujnika. Jest to czynnik kluczowy, ponieważ pozwala on na odizolowanie odbić spoza badanego zakresu, unikając błędnych, dodatkowych zliczeń.

Urządzenie obsługuje się pojedynczym przyciskiem, który wznawia kalibrację czujnika, jednocześnie resetując licznik. W miarę potrzeby możliwe jest, w prosty sposób, dodatkowe wmontowanie przycisku resetującego zliczenia. Układ zawiera także wyświetlacz ciekłokrystaliczny (LCD), który zapewnia dobrą jakość i szeroki zakres możliwości wyświetlanych danych za niewielką cenę. W trakcie pracy wyświetlana na nim jest ustawiona kalibracja (wartość *distance*) oraz aktualna liczba zliczeń połówek cykli wahadła.

3 Wybór optymalnej architektury — omówienie wyników

Przygotowane modele liczników w trzech różnych wersjach zostały zademonstrowane przed obsługą pracowni wstępnej i przetestowane w praktyce przy użyciu wahadła. Każdy z trzech czujników działał poprawnie, mierząc liczbę wahanć bez błędów. Pomimo tego warto podkreślić, że każde z urządzeń ma określone wady i zalety decydujące o jego sposobie użytkowania. Zostały one podsumowane w Tabeli 1.

Testy urządzeń doprowadziły do wniosku, że wybór jednej architektury obiektywnie lepszej od pozostałych jest niemożliwy — będzie to zależało od osobistych preferencji i umiejętności użytkowników. Z tego względu, każde z urządzeń zostanie wprowadzone do użytkowania. W dalszych etapach projektu, urządzenia zostaną umieszczone w obudowach oraz połączone z dostarczonymi przez obsługę pracowni ekranami. Decyzja o finalnym wyborze urządzenia zapadnie metodą "A/B testing" na podstawie opinii pracowników i użytkowników, po pewnym czasie długotrwałego użytkowania liczników w praktyce.

Rodzaj licznika	Zalety	Wady
Optyczny czujnik transmisyjny	• Brak potrzeby kalibracji • Duży zasięg	• Duży rozmiar obudowy
Optyczny czujnik odbiciowy	• Brak potrzeby kalibracji • Mały rozmiar	• Mały zasięg działania
Czujnik ultradźwiękowy	• Możliwość kalibracji • Duży zasięg	• Konieczność kalibracji

Tabela 1: Porównanie wad i zalet trzech modeli liczników.