



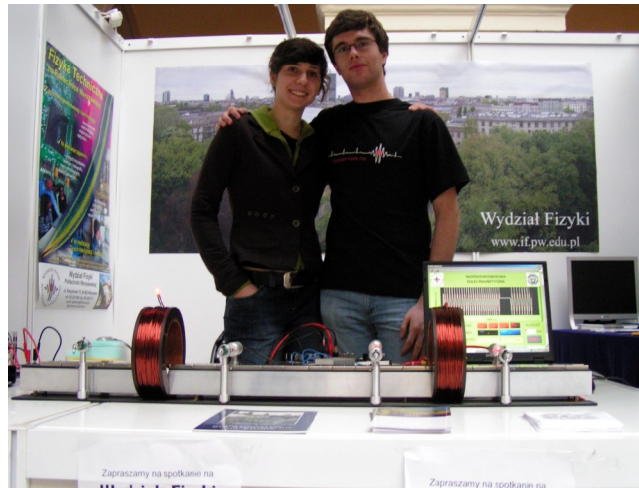
MAGNETYCZNA KOLEJ NADPRZEWODNIKOWA

Aleksandra Kosecka, Tomasz Pietrzak
opiekun: dr Jan Grabski



Spis treści

1. Wprowadzenie teoretyczne.....	2
2. Budowa toru magnetycznego.....	2
3. Oprogramowanie.....	3
4. Pomiary.....	4
4.1. Metoda pomiarowa.....	4
4.2. Zależność prędkości na torze.....	4
4.3. Zależność średniej prędkości od ustawienia czujników laserowych.....	5
4.4. Zależność średniej prędkości od prędkości początkowej.....	6
4.5. Zachowanie wagonu po wyłączeniu zasilania.....	7
4.6. Dyskusja niepewności pomiarowych.....	8
5. Rysunek techniczny układu.....	9

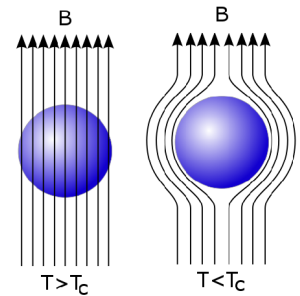


Abstrakt

Na podstawie prac i doświadczeń starszych kolegów, został zbudowany z magnesów neodymowych tor magnetyczny, nad którym lewituje styropianowy wagon z pastylkami nadprzewodnikowymi ceramiki układu Y-Ba-Cu-O. Laserowe czujniki pozwalają na sterowanie elektromagnesami napędzającymi pojazd. Zostało napisane oprogramowanie, które pozwala na kontrolę położenia i prędkości wagonu. W pracy został opisany zarówno proces budowy urządzenia, jak i przebieg pomiarów kinematycznych dokonanych na torze.

1. Wprowadzenie teoretyczne

Przez długi okres czasu materiały ze względu na ich właściwości elektryczne dzielono na przewodniki, półprzewodniki i izolatory. Cechuje je niezerowy opór elektryczny, powodowany przez oddziaływanie nośników ładunku (elektronów) z atomami ciała stałego lub płynu. Nadprzewodnikami nazwano materiały, które w określonych temperaturach wykazują zerowy opór elektryczny oraz wypychają pole magnetyczne (tzw. efekt Meissnera). Zerowa oporność oznacza, że przepływ prądu elektrycznego przez nadprzewodnik nie powoduje spadku potencjału na jego końcach; nie wydziela się tym samym ciepło Joule'a. Za przepływ prądu odpowiadają pary Coopera (sparowane elektrony) o spinie całkowitym, które są bozonami. Ich zachowanie opisuje zatem statystyka Bosego-Einsteina, a nie Fermiego-Diraca. Dopuszcza to kondensację cząstek na najniższym poziomie energetycznym. Własność ta znajduje zastosowanie w urządzeniach, przez które przepływają duże prądy, np. silne elektromagnesy akceleratora LHC, medycznych rezonansów magnetycznych czy kolei magnetycznych. Efekt Meissnera objawia się tym, że pole magnetyczne (mniejsze od pewnej granicznej wartości) nie wnika do nadprzewodnika, tzn. natężenie pola magnetycznego wewnątrz jest równe zero. Tuż przy powierzchni wytwarzają się prądy, które kompensują zewnętrzne pole magnetyczne wewnątrz nadprzewodnika.



Użyty w doświadczeniu nadprzewodnik jest nadprzewodnikiem II rodzaju (tzw. nadprzewodnikiem wysokotemperaturowym) układu Y-Ba-Cu-O, który przechodzi w stan nadprzewodnictwa w temperaturze nieco większej niż temperatura ciekłego azotu $77,35 K$. W chwili przejścia w stan nadprzewodnictwa, pastylka nadprzewodnika „zapamiętuje” pole magnetyczne, w jakim się znajdowała. Każda zmiana tego pola powoduje, że indukujące się w próbce prądy próbują przywrócić początkowe pole magnetyczne. Umożliwia to m. in. lewitację pastylki nadprzewodnikowej nad magnesami stałymi.

2. Budowa toru magnetycznego

Rysunek techniczny toru został dołączony do niniejszego opracowania. Do aluminiowego przekroju prostokątnego przykręcony został żelazny płaskownik o długości $1000 mm$. Na płaskownik zostały położone w trzech rzędach sztabki magnesów neodymowych, przy czym w danym rzędzie magnesy ułożone są w tym samym kierunku. Aby wagon trzymał się na torze, kierunek pola magnetycznego środkowego rzędu musi być przeciwny do zewnętrznych rzędów. Warto zauważyć, że magnesy są tak silne, iż same trzymają się toru. Co więcej, oderwanie pojedynczej sztabki jest bardzo trudne i wymaga użycia dużej siły.

W przekroju dokonano dwóch wcięć, które posłużyły za mocowanie elektromagnesów. Dodatkowe płaskowniki przykręcone do przekroju aluminiowego służą za mocowanie cewek i stabilizują konstrukcję. Ponadto mocowane są do nich lasery i czujniki, które posiadają magnesy na spodzie podstawek.

Układem steruje komputer PC wyposażony w kartę pomiarową National Instruments DAQ-AI-16E-4 podłączaną przez port PCMCIA. Karta posiada, między innymi, osiem wejść/wyjść cyfrowych oraz osiem wejść analogowych.

Elektromagnesy są zasilane ze stabilizowanego zasilacza ELUR SPS 450L. Napięcie pracy wynosi ok. $30 V$, prąd szczytowy dochodzi do $15 A$. Obwód jest zamykany przez elektroniczne przekaźniki sterowane poziomami logicznymi z karty pomiarowej.

Czujniki położenia zbudowane są z czerwonych laserów półprzewodnikowych skierowanych na czujniki optyczne. Lasery zasilane są z zasilacza Motech LPS-304 napięciem $3,2 V$. Prąd pobierany przez cztery przyrządy nie przekracza $60 mA$.

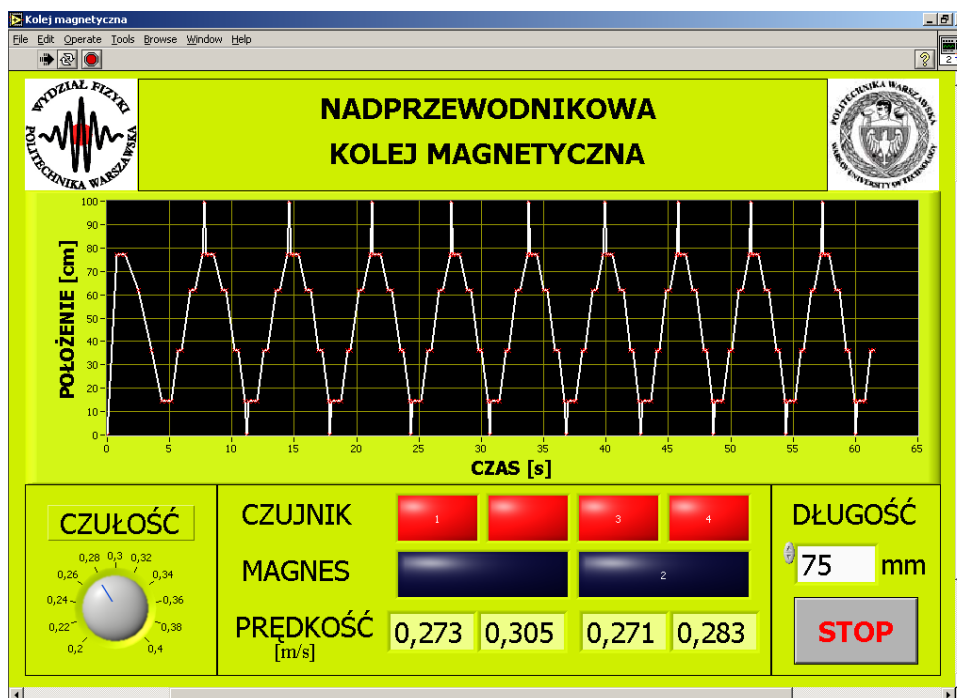
3. Oprogramowanie

Obsługę użytych urządzeń zapewnia napisany program w środowisku LabVIEW. Środowisko to umożliwia programiście w prosty sposób na kontrolę urządzeń pomiarowych (w szczególności firmy National Instruments) oraz posiada wiele gotowych rozwiązań do wizualizacji pomiarów. Obsługa elektromagnesów jest realizowana przez dwa wyjścia cyfrowe karty pomiarowej, które sterują elektronicznymi urządzeniami przekaźnikowymi. Napięcie z czujników laserowych jest czytywane za pomocą 4 wejść analogowych.

Program w czasie pracy włącza odpowiedni elektromagnes, gdy wagon przejeżdża przez określony czujnik laserowy. „Diody” pokazują, które czujniki aktualnie są zasłonięte i przez którą cewkę przepływa prąd. Do prawidłowej pracy programu należy wpisać w odpowiednie pole tekstowe długość wagonu oraz ustawić odpowiedni próg czułości czujników laserowych. W czasie pracy program rysuje wykres położenia pojazdu w funkcji czasu oraz podaje średnie prędkości przejazdu przez poszczególne czujniki.

Po zakończeniu pomiarów, wyniki są zapisywane do wskazanego pliku tekstowego. W pierwszej kolumnie umieszczony jest czas pomiaru, a w kolejnych czterech wartości prędkości odczytanych na czujnikach.

Zrzut ekranu z programu w czasie pracy zamieszczamy poniżej:



4. Pomiar

4.1. Metoda pomiarowa

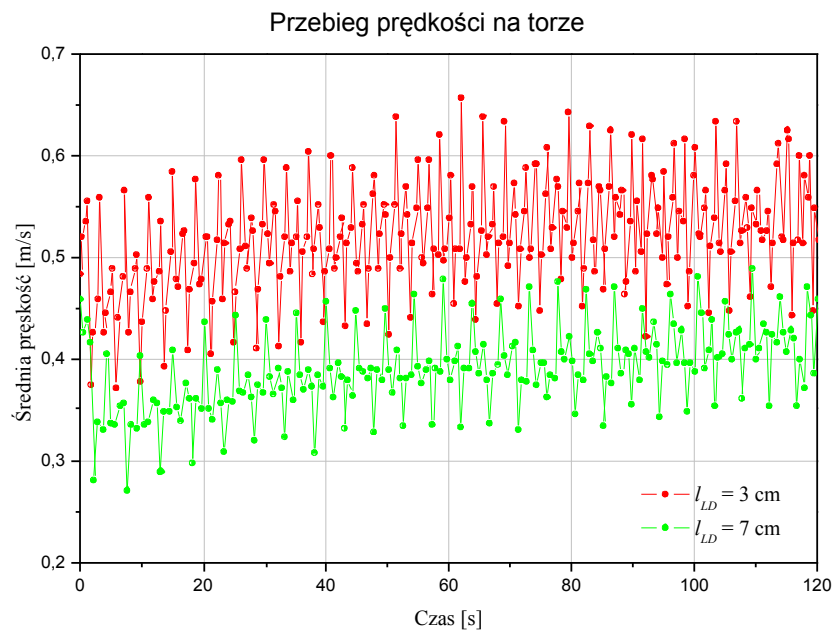
Po ustawieniu czujników laserowych w określonej odległości l_{LD} od elektromagnesów, następowały trzy pomiary ruchu pojazdu, w zależności od prędkości początkowej. Należało jeszcze umieścić wagon na linijce (o grubości $h=(3,0\pm 0,1)mm$), a następnie napełnić go ciekłym azotem w celu wprowadzenia pastylek z ceramiką Y-Ba-Cu-O w stan nadprzewodnictwa. W pierwszym przypadku, wagonik był delikatnie popychany i powoli wchodził w obszar działania pierwszego elektromagnesu. W drugim przypadku, wagon był wypychany przez gradient pola magnetycznego występującego na końcu toru. Zapewniało to największą powtarzalność pomiarów. W trzecim przypadku, wagon był znacząco popychany przez eksperymentatora. Serie pomiarów trwały nie mniej niż 120 sekund.

Dane z serii pomiarów były zapisywane do osobnych plików tekstowych. Wykonano serie pomiarów dla $l_{LD}=1cm, 3cm, 5cm, 7cm$. Ponadto dla największej odległości zbadano, jak zachowuje się wagon w przypadku wyłączenia zasilania cewek.

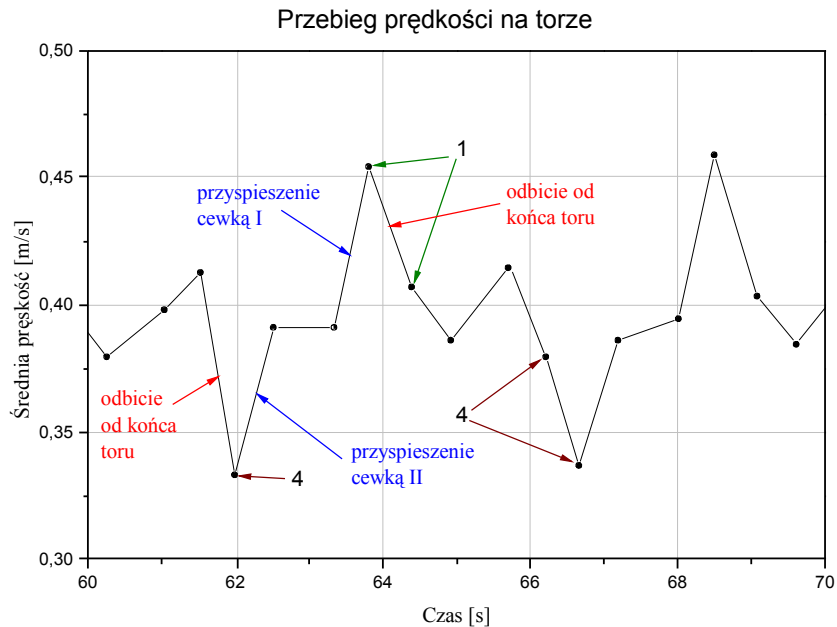
Przed przystąpieniem do analizy zebranych danych, zostały one przetworzone za pomocą skryptów powłoki *bash* systemu operacyjnego Linux oraz prostych programów napisanych w języku C.

4.2. Zależność prędkości na torze

Zbadanie zależności prędkości wagonu w poszczególnych miejscach toru pozwala sprawdzić, jaki wpływ na ruch wagonu mają elektromagnesy oraz zmiana kierunku jazdy na końcach toru. Na wykresie umieszczono średnie prędkości przejazdu wagonu przez poszczególne czujniki laserowe w funkcji czasu. Pokazano zależności dla odległości czujników laserowych od cewek $l_{LD}=3cm, 7cm$.



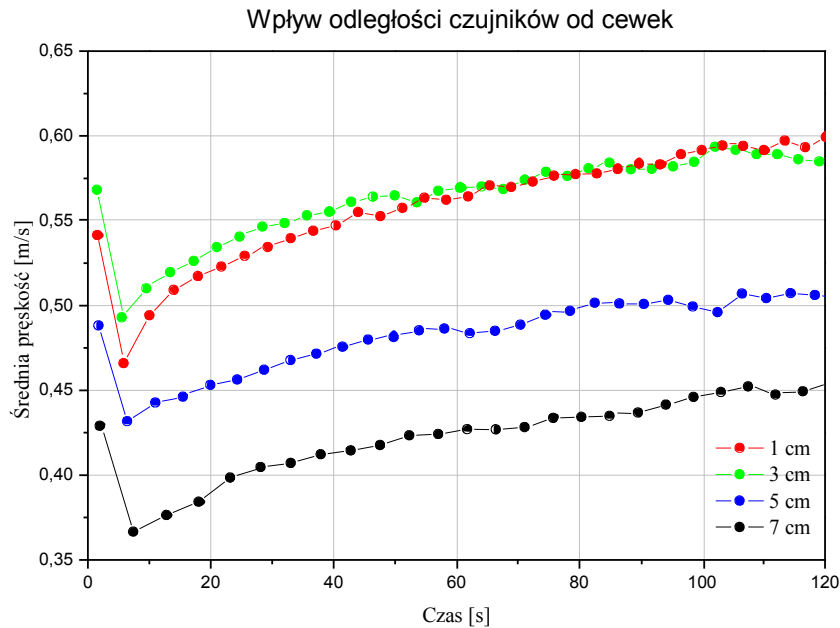
Z powyższego wykresu wynika, że na prędkość średnią ruchu nałożone są znaczne oscylacje wynikające z pracy elektromagnesów oraz zmiany kierunku jazdy na końcach torów. Zależność prędkości średniej od odległości l_{LD} zostanie przedyskutowana w kolejnym punkcie. Poniższy wykres pozwala się bliżej przyjrzeć wpływowi cewek i odbicia na końcach torów na chwilowe prędkości wagonów:



Na powyższym wykresie zaznaczono, które punkty pomiarowe pochodzą od czujników 1 i 4. Łatwo również zauważyć, że szybkie przyrosty prędkości są spowodowane włączeniem się uzwojeń odpowiednich elektromagnesów. Dodatkowo widzimy, że wagon traci znaczną część energii kinetycznej w czasie odbijania się od krańców torów.

4.3. Zależność średniej prędkości od ustawienia czujników laserowych

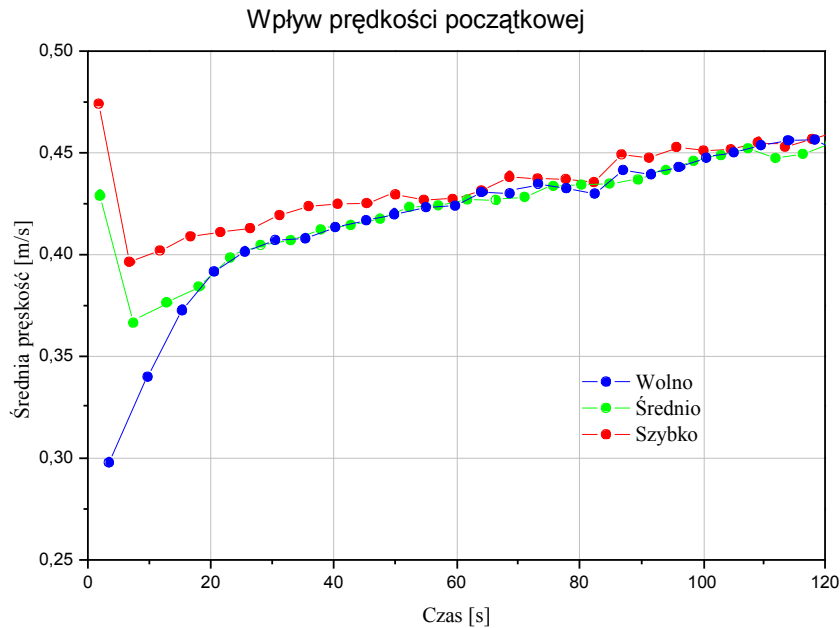
Najważniejszym czynnikiem mającym wpływ na prędkości osiągnięte przez wagon ma sposób włączania cewek. Przypomnijmy, że przez uzwojenia płynie prąd, kiedy wagon zasłania odpowiedni czujnik laserowy. Naturalną konsekwencją takiego rozwiązania jest fakt, że właśnie dobór odpowiedniego ustawienia czujników ma wpływ na przyspieszanie wagonu. Poniższy wykres ilustruje zależność średniej prędkości osiągniętej na torze (przez prędkość średnią będziemy dalej rozumieć dwukrotną długość toru podzieloną przez czas przebycia tej drogi) od odległości l_{LD} :



Można zauważyć, że średnia prędkość wagonu maleje wraz ze wzrostem odległości czujników laserowych od cewek. Tłumaczy się to tym, że wraz ze wzrostem odległości od uzwojenia maleje gradient pola magnetycznego, a tym samym siła wypychająca nadprzewodniki. Przy małych odległościach l_{LD} w chwili włączenia prądu w uzwojeniu, fragmenty pastylek nadprzewodnikowych mogą znajdować się w środku, lub nawet przed środkiem symetrii cewek. Tłumaczy to, czemu zbliżanie czujników na odległość mniejszą niż 3 cm nie poprawia osiągow pojazd.

4.4. Zależność średniej prędkości od prędkości początkowej

Jak wspomnieliśmy w p. 4.1., pomiary wykonywane były dla różnych prędkości początkowych u_0 . Poniższy wykres pozwoli nam zobaczyć, jaki jest wpływ prędkości początkowej na ruch wagonu oraz po jakim czasie pojazd osiąga stan równowagi (oczywistym jest fakt, że prędkość graniczna pojazdu zależy od l_{LD} , ale nie od u_0).

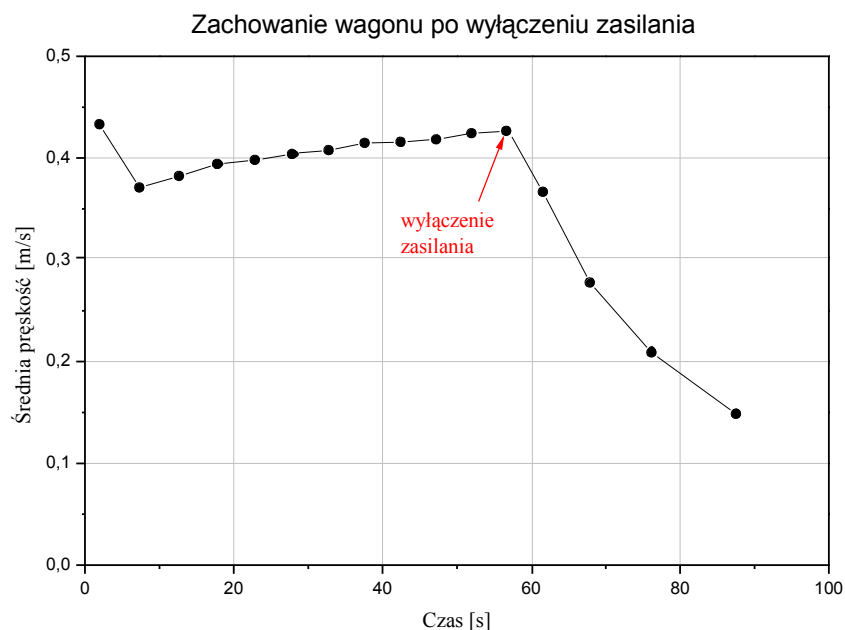


Z powyższego wykresu widać, że wpływ prędkości początkowej staje się pomijalny już po ok. 30 sekundach. Z pewnością duży wpływ na tę właściwość mają znaczące straty energii przy pierwszym odbiciu się wagonu od końca toru. Powyższe dane doświadczalne wskazują także, że prędkość pojazdu nie będzie rosła do dużych wartości, ale dąży asymptotycznie do niecałych $0,5 \text{ m/s}$ (dla $l_{LD} = 7 \text{ cm}$). Czynnikiem ograniczającym są z pewnością opory ruchu. Można również podejrzewać, że przy wzroście prędkości (i ustalonym l_{LD}) maleje wydajność cewek. Tłumaczy się to tym, że przy krótszym czasie pracy elektromagnesów, coraz większy wpływ ma indukcyjność cewki, zmniejszająca wartość szczytowego natężenia prądu płynącego przez uzwojenie.

4.5. Zachowanie wagonu po wyłączeniu zasilania

Aby uwidocznić, jak wielkie znaczenie dla pracy pojazdu ma rozpędzanie go polem elektromagnetycznym cewek, po ok. 60 sekundach jazdy, został wyłączony zasilacz uzwojeń. Zachowanie wagonu w takiej sytuacji (dla $l_{LD} = 7 \text{ cm}$) ilustruje rysunek poniżej.

Z wykresu widać, że wyłączenie zasilania nastąpiło, zanim wagon osiągnął prędkość graniczną. Po 30 sekundach jazdy "swobodnej", prędkość pojazdu zmalała około trzykrotnie. Wagon zatrzymał się całkowicie w czasie mniejszym niż jedna minuta. Widzimy, że oporu ruchu kolei magnetycznej, choć mniejsze niż tradycyjnej kolei szynowej, są łatwo zauważalne i ciągła praca (ruch) urządzenia wymaga stałego dopływu energii do układu.



4.6. Dyskusja niepewności pomiarowych

Ponieważ pomiary przedstawione w punkcie 4. miały przede wszystkim na celu jakościową analizę zachowania się wagonu pod wpływem zmiany różnych parametrów, niepewności towarzyszące pomiarom nie były do tej pory dyskutowane. Poniższe oszacowania mają wykazać, że niepewności nie mają zauważalnego wpływu na jakościową interpretację wyników i mogły być w powyższej części pracy zaniedbane.

Wagon kolei został zmierzony linijką z dokładnością $\Delta l = 1 \text{ mm}$. Odległość czujników laserowych mierzona była suwmiarką, jednak budowa układu utrudniała dokładny pomiar, stąd bezpiecznie jest założyć $\Delta l_{LD} = 1 \text{ mm}$. Pomiar czasu w programie obarczony jest niepewnością $\Delta t = 1 \text{ ms}$. Łatwo zauważyć, że czas przejazdu wagonu przez czujnik wynosi $t_{0,25 \text{ m/s}} = 300 \text{ ms}$ dla prędkości $v_1 = 0,25 \text{ m/s}$ oraz $t_{0,75 \text{ m/s}} = 100 \text{ ms}$ dla prędkości $v_2 = 0,75 \text{ m/s}$. Niepewność względną wyznaczenia prędkości możemy oszacować metodą różniczki logarytmicznej:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta l}{l}$$

Podstawiając odpowiednie wartości otrzymujemy:

$$\frac{\Delta v_1}{v_1} \approx 1,7\% \quad \frac{\Delta v_2}{v_2} \approx 2,4\%$$

Widzimy więc, że oszacowany błąd pomiarów nie przekracza 3% i jego zaniedbanie wydaje się być uzasadnione.

5. Rysunek techniczny układu

