

Magnetyczny pociąg

Dominik Bejma^a, Filip Fudala^b

^aVIII Liceum Ogólnokształcące im. KEN w Gdańsku, oddział III F

^bVIII Liceum Ogólnokształcące im. KEN w Gdańsku, oddział IIF

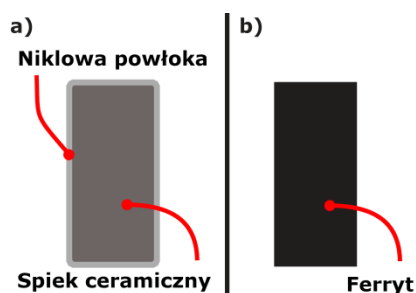
Poniższy artykuł dotyczy jednego z problemów zaproponowanych w tegorocznym Turnieju Młodych Fizyków. Treść problemu była następująca:

„Magnetyczny pociąg – Do obu końców cylindrycznej baterii są przyłączone pastylkowe magnesy. Gdy taką baterię umieści się wewnątrz miedzianej cewki, tak aby magnesy dotykały jej zwojów, taki „pociąg” zacznie się poruszać. Wyjaśnij to zjawisko i zbadaj, jak istotne parametry wpływają na prędkość i moc pociągu”.

1. Wstęp

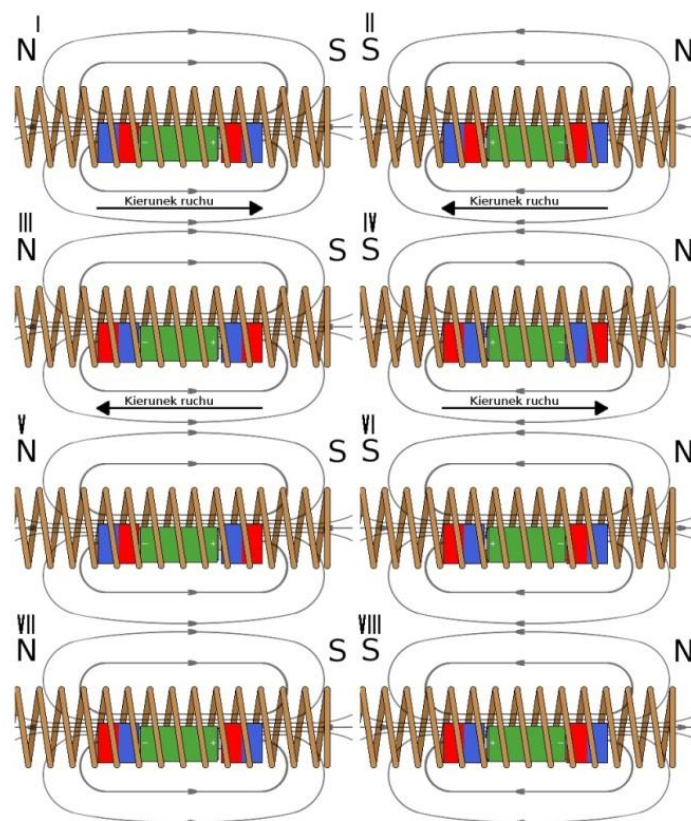
Prąd płynący przez zwojnicę wytwarza pole magnetyczne. Jeśli w polu tym zostanie umieszczony magnes stały, w zależności od orientacji biegunów magnesu, działa nań siła magnetyczna wciągająca go do zwojnicy lub odpychająca go od niej. To właśnie siła magnetyczna jest przyczyną ruchu modelu pociągu, złożonego z baterii oraz przymocowanych do niej magnesów.

Aby w zwojnicy powstało pole magnetyczne oddziałujące z magnesami przymocowanymi do baterii, konieczne jest, by bateria i sekcja zwojnicy, w której ta bateria się znajduje, utworzyły obwód zamknięty. Niezbędne jest więc, aby magnesy na biegunach baterii przewodziły prąd. Dodatkowo magnesy te muszą być silne na tyle, żeby siła magnetyczna działająca na nie mogła ruszyć pociąg z miejsca, pokonując siłę tarcia statycznego między magnesami a zwojnicą. Konieczne jest zatem użycie magnesów neodymowych, gdyż bardzo dobrze przewodzą prąd, dzięki powłoce z metalicznego niklu (rys. 1), i są najsilniejszymi magnesami powszechnie dostępnymi na rynku.



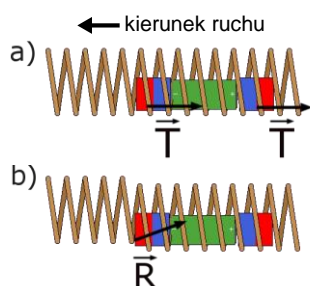
Rys. 1. Schemat budowy: a) magnesu neodymowego, b) ferrytowego

Kolejnym warunkiem koniecznym, by pociąg mógł samodzielnie się poruszać, jest to, aby działała niezerowa wypadkowa sił magnetycznych działających na oba magnesy. Na rys. 2 zaprezentowano różne możliwe ułożenia baterii i magnesów.



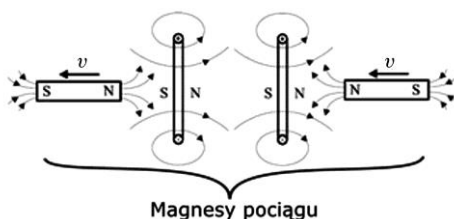
Rys. 2. Ułożenie magnesów a kierunek jazdy pociągu. W sytuacjach I, II, III, IV zwroty sił magnetycznych działających na oba magnesy są takie same, więc na pociąg działa w osi ruchu siła wypadkowa. W sytuacjach V, VI, VII, VIII siły działające na magnesy wzajemnie się znoszą (zob. rys. w kolorze na okładce *Fotonu*)

Na jadący pociąg działają opory ruchu. Są to opory natury mechanicznej, a także natury elektromagnetycznej – wynikające z reguły Lenza. Mechaniczne opory ruchu to: tarcie ślizgowe między magnesami a zwojnicą (rys. 3a), spontanicznie występująca asymetryczna siła reakcji zwojnicy na nacisk, spowodowana najechaniem pociągu na nierówności w zwojnicy (rys. 3b) oraz siła oporu powietrza, którą można jednak można pominąć ze względu na małą powierzchnię przekroju poprzecznego i niewielką prędkość pociągu. W naszym eksperymencie maksymalna uzyskana prędkość była mniejsza niż 1,2 m/s.



Rys. 3. Opory mechaniczne: a) tarcie kinetyczne, b) siła reakcji zwojnicy na nacisk przy najeźdzeniu pociągu na nierówność. Siły te nie zależą od prędkości pociągu, a jedynie od jego ciężaru

Siła magnetyczna przeciwstawiająca się ruchowi pociągu zasługuje na szczególną uwagę. Wartość indukcji pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes maleje wraz z odległością od niego, tak więc ruch magnesu w zwojnicy powoduje zmianę strumienia magnetycznego przez zwoje znajdujące się pomiędzy magnesami pociągu, a także te przed oraz za pociągiem. Jak wynika z reguły Lenza i prawa indukcji, ruch pociągu powoduje powstawanie SEM i przepływ prądu w odcinku zwojnicy tworzącym wraz z magnesami i baterią obwód zamknięty. Powoduje to powstanie pola magnetycznego przeciwdziałającego zmianie strumienia magnetycznego. Zmiana strumienia magnetycznego jest tym szybsza, im większa jest prędkość pociągu. Tak więc siła magnetyczna przeciwdziałająca ruchowi pociągu również rośnie wraz ze wzrostem prędkości pociągu.



Rys. 4. Ruch magnesów powoduje zmianę strumienia magnetycznego przez poszczególne zwoje i indukowanie w nich SEM. Zgodnie z regułą Lenza powstały w zwojach prąd będzie wytwarzał pole magnetyczne przeciwdziałające ruchowi magnesów. Na rysunku zaznaczony jest kierunek prądu w zwojach wywołanego indukcją elektromagnetyczną

Obecność siły zależnej od prędkości oznacza, że pociąg w pewnym momencie osiągnie prędkość graniczną, przy której siły działające nań zaczną się równoważyć i od tego momentu będzie on poruszać się ruchem jednostajnym. Zgodnie z I zasadą dynamiki Newtona mamy:

$$F_p - F_{mech} - F_{mag}(v_{gr}) = 0,$$

gdzie:

F_p – siła magnetyczna działająca na pociąg w stanie bezruchu;

F_{mech} – siły oporu pochodzenia mechanicznego;

F_{mag} – siła magnetyczna wynikająca z reguły Lenza, zależna od prędkości;

v_{gr} – prędkość graniczna pociągu.

Średnią moc pociągu P_p podczas ruchu jednostajnego z prędkością graniczną można bardzo łatwo obliczyć ze wzoru:

$$P_p = F_p v_{gr}.$$

Istotnymi parametrami wpływającymi na ruch pociągu są: SEM baterii, gęstość nawoju cewki, jakość nawoju cewki (występowanie nierówności), liczba i jakość użytych magnesów oraz masa pociągu.

2. Metoda badawcza

Badanie polegało na wyznaczeniu siły działającej na pociąg oraz jego prędkości granicznej w zależności od:

- a) liczby magnesów pociągu,
- b) gęstości nawoju cewki.

Do wszystkich badań były używane baterie alkaliczne 1,5 V.

Średnica magnesów użytych do budowy pociągu musi być wyraźnie większa od średnicy baterii (rys. 5a). Gdy średnica magnesów i baterii jest zbliżona (rys. 5b), najechanie przez pociąg nawet na małą nierówność zwojniczy powoduje przemieszczenie przedniego magnesu względem osi baterii i utratę kontaktu magnesu ze zwojnicą, a więc przerwanie obwodu i zatrzymanie pociągu.



Rys. 5. Pociąg: a) właściwie zbudowany, b) niewłaściwie zbudowany

Bolec na dodatnim biegunie niektórych baterii nie jest idealnie płaski, przez co magnesy po zamocowaniu czasem kołyszają się. Efekt ten można zminimalizować nakładając na bolec podkładkę od śruby. Podczas testów liczba magnesów na obu końcach baterii była zawsze jednakowa. Pomiary zostały wykonane dla 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 magnesów po każdej stronie.

Cewka wykorzystana do badań została wykonana z drutu miedzianego o średnicy przekroju poprzecznego 2,5 mm i długości $L = (33,0 \pm 0,1)$ m. Drut został nawinięty ręcznie na drąg drewniany, w wyniku czego powstała z niego cewka o średnicy $\phi = (30 \pm 1)$ mm. Liczba zwojów całej cewki $N = 350 \pm 13$,

$$N = \frac{L}{\pi \phi},$$

$$\Delta N = N \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \phi}{\phi} \right),$$

gdzie:

ΔN – niepewność maksymalna liczby zwojów cewki.

Cewka w trakcie badań była umieszczona na płaskim, poziomym blacie między dwoma deskami utrzymującymi cewkę w linii prostej. Wzdłuż jednej z desek była przymocowana taśma miernicza. Długość cewki l mogła być regulowana w trakcie badań za pomocą nici przymocowanych na końcach cewki, tak aby uzyskiwać różne gęstości nawoju n (liczba zwojów na 1 m długości cewki).

$$n = \frac{L}{\pi \phi l}$$

$$\Delta n = n \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \phi}{\phi} + \frac{\Delta l}{l} \right)$$

gdzie:

Δn – niepewność maksymalna gęstości nawoju cewki.

Pomiary zostały wykonane dla:

$$l = (0,700 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (500 \pm 22) \text{ 1/m}$$

$$l = (0,800 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (438 \pm 19) \text{ 1/m}$$

$$l = (0,900 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (389 \pm 17) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,000 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (350 \pm 15) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,100 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (318 \pm 14) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,200 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (292 \pm 12) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,300 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (269 \pm 11) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,400 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (250 \pm 10) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,500 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (233 \pm 10) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,600 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (219 \pm 9) \text{ 1/m}$$

$$l = (1,700 \pm 0,005) \text{ m} \rightarrow n = (206 \pm 9) \text{ 1/m}$$

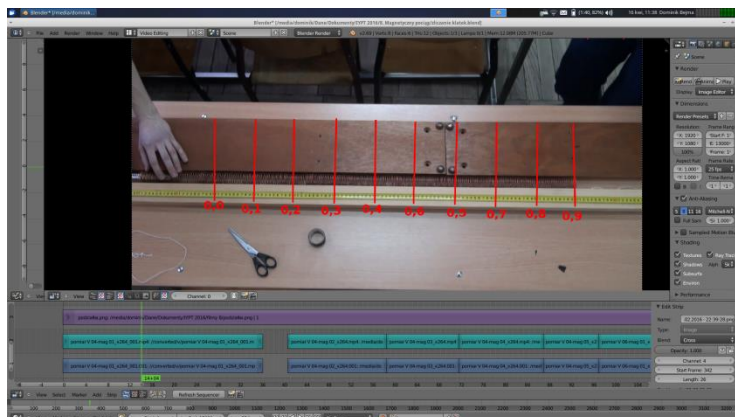
Ruch pociągu wewnątrz zwojnicy był rejestrowany przez kamerę umieszczoną na statywie ponad zwojnicą. W tym celu wykorzystano kamerę wideo rejestrującą w tempie 25 klatek na sekundę i rozdzielczości 1080×1920 . Pięciokrotnie nagrano ruch pociągu dla każdej z wymienionych sytuacji (tab. 1).

Tabela 1. Zbadane sytuacje

Numery prób	Liczba magnesów pociągu M :	Gęstość nawoju cewki n (1/m):
1–5	2	318 ± 13
6–10	4	318 ± 13
11–15	6	318 ± 13
16–20	8	318 ± 13
21–25	10	318 ± 13
26–30	12	318 ± 13
31–35	14	318 ± 13
36–40	10	206 ± 9
41–45	10	219 ± 9
46–50	10	233 ± 10
51–55	10	250 ± 10
56–60	10	269 ± 11
61–65	10	292 ± 12
66–70	10	318 ± 14
71–75	10	350 ± 15
76–80	10	389 ± 17
81–85	10	438 ± 19
86–90	10	500 ± 22

Pomiędzy kolejnymi próbami dokonywane były pomiary SEM baterii. Do tego celu został wykorzystany multimetr cyfrowy UNI-T M890G o oporze wewnętrznym $10 \text{ M}\Omega$, pracujący na zakresie 20 V . Niepewność pomiaru SEM została oszacowana na $0,015 \text{ V}$. Pomiary te miały zapewnić utrzymywanie w przybliżeniu stałego napięcia w trakcie doświadczeń poprzez wymianę baterii w odpowiednim momencie.

Następnie nagrania zostały wykorzystane do sporządzenia wykresów zależności drogi przebytej przez pociąg od czasu. W tym celu został wykorzystany program Blender. Na nagrania wczytane do programu została nałożona cyfrowo podziałka dopasowana do taśmy mierniczej przymocowanej wzdłuż zwojnicy. Kreski na podziałce cyfrowej odpowiadały kolejnym wielokrotnościom 10 cm na taśmie mierniczej (rys. 6). Dzięki temu możliwe było policzenie, ile dokładnie klatek trwa przejazd pociągu przez kolejne dziesięciocentymetrowe sekcje zwojnicy.



Rys. 6. Zliczanie klatek w programie Blender. Na wideo została naniesiona cyfrowo podziałka dopasowana do taśmy mierniczej

Dzięki znajomości odstępów pomiędzy kolejnymi klatkami wideo (1/25 sekundy), możliwy był pomiar czasu. Niepewności pomiarowe zostały określone następująco:

- a) niepewność pomiaru położenia: $\Delta x = 0,03$ m,
- b) niepewność pomiaru czasu: $\Delta t = 0,04$ s.

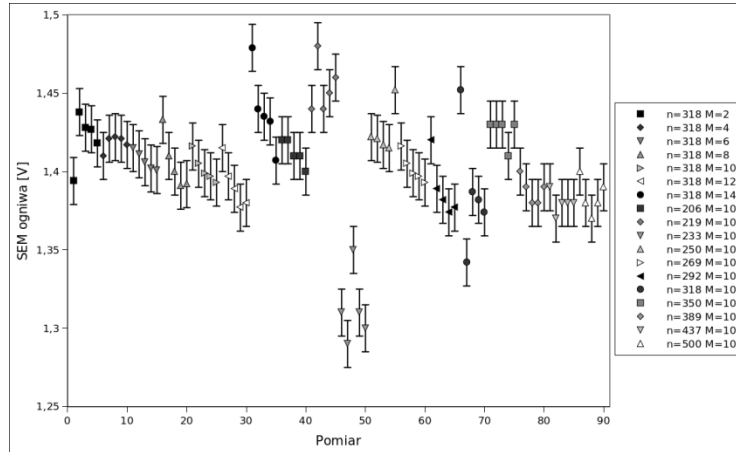
Dla każdej z badanych sytuacji (tab. 1) zmierzono również siłę działającą na pociąg. W tym celu do tylnego magnesu pociągu była dołączona nakrętka śruby maszynowej, dzięki której można było łatwo przywiązać pociąg do siłomierza za pomocą nitki (rys. 7). Pociąg przywiązany nitką do siłomierza był wpuszczany do zwojnicy, tak aby samodzielnie wjechał do jej wnętrza. Po napięciu się nici, pociąg zatrzymywał się. Siła naciągu nici odczytana z siłomierza odpowiadała więc sile działającej na pociąg. Oszacowana niepewność pomiaru siły to: $\Delta F = 0,2$ N.



Rys. 7. Pociąg połączony nitką z siłomierzem

3. Dyskusja wyników

Napięcie na baterii w trakcie eksperymentu było w przybliżeniu stałe, dzięki czemu przy interpretacji otrzymanych wyników możliwe jest pominięcie wpływu wartości SEM, a skupienie się jedynie na wpływie liczby użytych magnesów M i gęstości nawoju zwojnicy n (rys. 8).



Rys. 8. Zmiany SEM baterii w trakcie eksperymentu. Podczas eksperymentu bateria była wymieniana kilkakrotnie

Średnia wartość SEM w trakcie pomiarów to: $\bar{\mathcal{E}} = 1,402 \text{ V}$.

Średnia niepewność kwadratowa wartości średniej SEM jest zdefiniowana jako:

$$S(\bar{\mathcal{E}}) = \sqrt{\frac{1}{m(m-1)} \sum_{i=1}^m (\mathcal{E}_i - \bar{\mathcal{E}})^2},$$

gdzie:

m – liczba pomiarów;

\mathcal{E} – SEM.

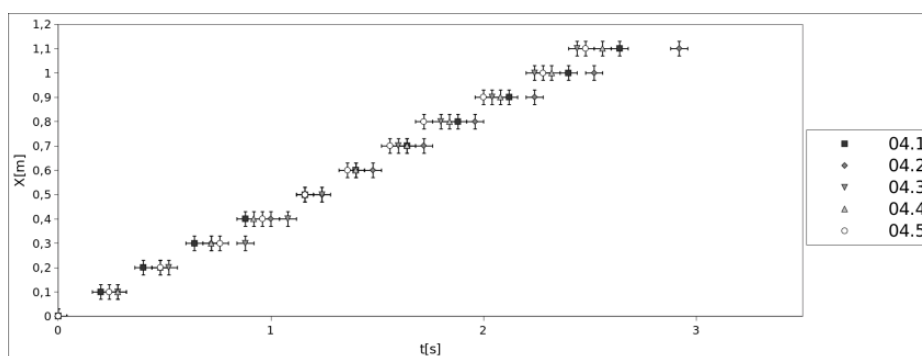
Wyniosła ona: $S(\bar{\mathcal{E}}) = 0,004 \text{ V}$.

Dopuszczalne jest więc założenie, że wartość SEM była stała.

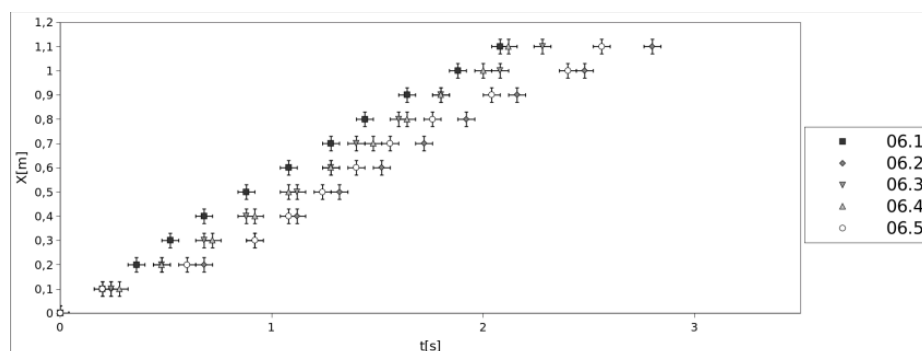
Pomiary pozwoliły na potwierdzenie hipotezy o istnieniu prędkości granicznej pociągu, zależnej od gęstości nawoju cewki oraz liczby magnesów. Dla prób 6–35 zostały wykonane wykresy drogi przebytej przez pociąg x od czasu t (rys. 9–15). Dla prób 1–5 wykonanie wykresów $x(t)$ było niemożliwe, ponieważ dla 2 magnesów siła magnetyczna działająca na pociąg była zbyt mała, by pokonać opory ruchu natury mechanicznej i pociąg zatrzymywał się co kilkanaście centymetrów. Potrząśnięcie zwojnicą w przypadku zatrzymania pociągu sprawiło, że tarcie statyczne zmieniało się w kinetyczne – poślizgowe, dzięki czemu pociąg ruszał na chwilę z miejsca, by po najechaniu na małą nierówność znów się zatrzymać.

Z wykresów dla prób 6–35 wynika, że pociąg osiąga prędkość graniczną już po kilkunastu milisekundach od startu. Do obliczenia prędkości granicznej można więc pominąć pierwszy etap ruchu przyspieszonego i przyjąć, że pociąg porusza się ruchem jednostajnym na całej swej drodze. Wykresy dla prób 36–90

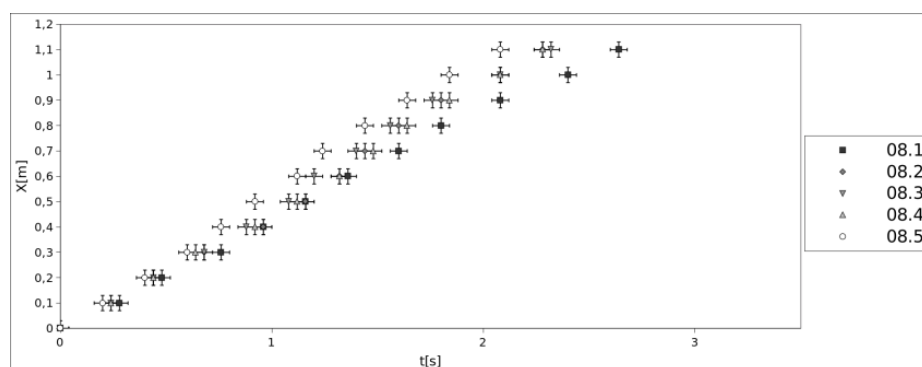
nie zostały przedstawione, gdyż nie są potrzebne do wyznaczenia prędkości granicznej.



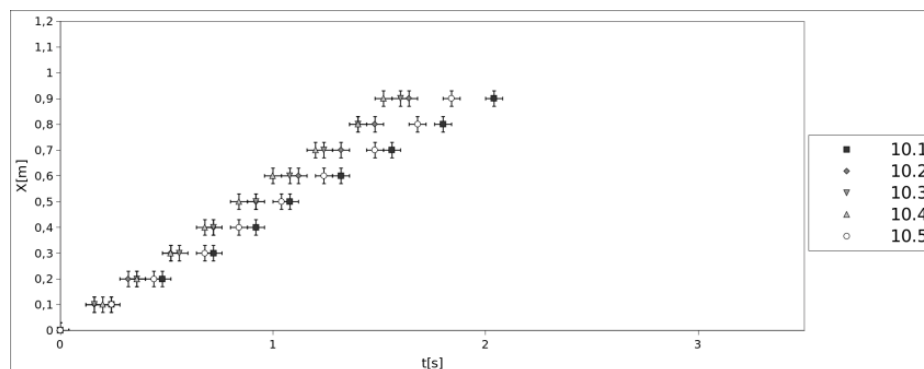
Rys. 9. Próby dla $M = 4$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami



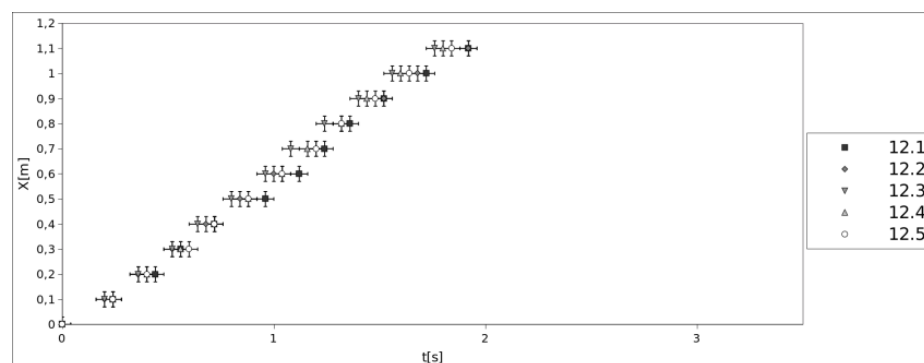
Rys. 10. Próby dla $M = 6$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami



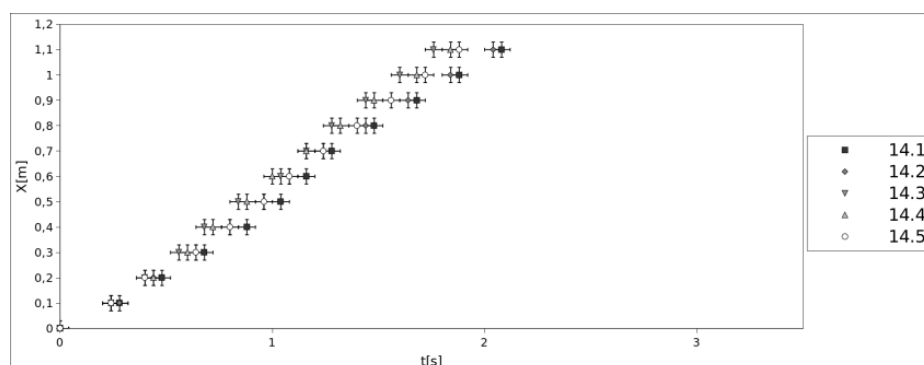
Rys. 11. Próby dla $M = 8$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami



Rys. 12. Próby dla $M = 10$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami



Rys. 13. Próby dla $M = 12$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami



Rys. 14. Próby dla $M = 14$, $n = 318$ 1/m. Kolejne przejazdy pociągu zaznaczono różnymi symbolami

W każdej z badanych sytuacji (tab. 1), dla każdego z pięciu przejazdów została osobno wyznaczona prędkość graniczna v_i przy założeniu, że jest ona równa średniej prędkości:

$$v_i = \frac{x_c}{t_c},$$

gdzie:

v_i – prędkości graniczne kolejnych przejazdów 1, 2, 3, 4, 5;

x_c – długość odcinka zwojnicy objętego podziałką;

t_c – całkowity czas przejazdu przez część zwojnicy objętą podziałką dla kolejnych przejazdów 1, 2, 3, 4, 5.

Dla każdej zbadanej sytuacji (tab. 1) została obliczona średnia prędkość graniczna pociągu:

$$v = \bar{v} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5}.$$

Całkowita niepewność wartości prędkości granicznej $u(v)$ została oszacowana z uwzględnieniem niepewności typu B oraz niepewności typu A dla poziomu ufności $p = 0,9$ z wykorzystaniem rozkładu Studenta:

$$u(v) = \sqrt{u_A^2(v) + u_B^2(v)}.$$

Niepewność typu A:

$$u_A^2(v) = t_{p,k-1}^2 \frac{(v_1 - \bar{v})^2 + \dots + (v_5 - \bar{v})^2}{k(k-1)},$$

gdzie:

$t_{p,k-1}$ – współczynnik Student dla poziomu ufności $p = 0,9$ i stopni swobody

$k-1 = 4$, $t_{p,k-1} = 2,1318$ [1]

k – liczba pomiarów, $k = 5$.

Niepewność typu B:

$$u_B^2(v) = \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 u^2(x) + \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 u^2(t)}{3},$$

$$u_B^2(v) = \frac{\left(\frac{1}{\bar{t}_c}\right)^2 u^2(x_c) + \left(-\frac{x_c}{\bar{t}_c^2}\right)^2 u^2(\bar{t}_c)}{3},$$

gdzie: \bar{t}_c – średnia arytmetyczna t_c dla kolejnych przejazdów 1, 2, 3, 4, 5.

Pomiar x_c został wykonany raz, dlatego:

$$u^2(x_c) = \frac{\Delta x_c^2}{3},$$

gdzie: Δx_c – niepewność maksymalna pomiaru x_c , $\Delta x_c = 0,03$ m.

Pomiar t_c był powtarzany pięciokrotnie, dlatego:

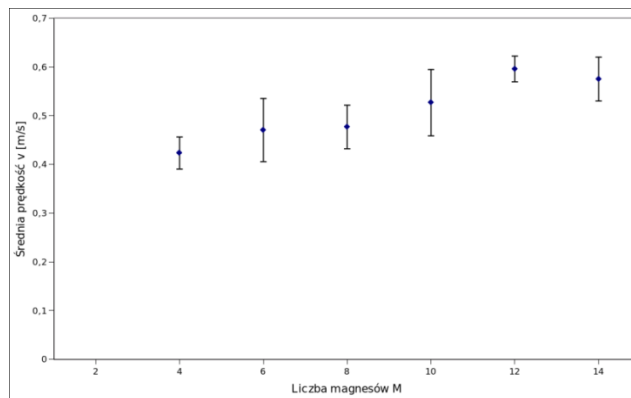
$$u^2(\bar{t}_c) = t_{p,n-1}^2 \frac{(t_{c1} - \bar{t}_c)^2 + \dots + (t_{c5} - \bar{t}_c)^2}{k(k-1)} + \frac{\Delta t_c^2}{3},$$

gdzie:

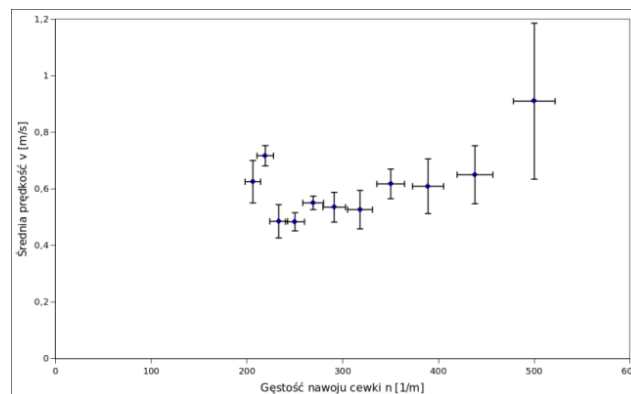
Δt_c – niepewność maksymalna pomiaru t_c , $\Delta t_c = 0,04$ s;

$t_{p,k-1}$ – współczynnik Studenta dla poziomu ufności $p = 0,9$ i stopni swobody $k-1 = 4$, $t_{p,k-1} = 2,1318$ [1].

Prędkość graniczna wyraźnie zmienia się w zależności od liczby magnesów M (rys. 15), jak i gęstości nawoju cewki n (rys. 16). Dla dużych wartości n niepewność pomiaru prędkości jest większa, gdyż zwojnica, a co za tym idzie droga, jaką może przebyć pociąg, staje się coraz krótsza. W połączeniu z jednoczesnym wzrostem prędkości sprawia to, że rozrzut wyników staje się większy.

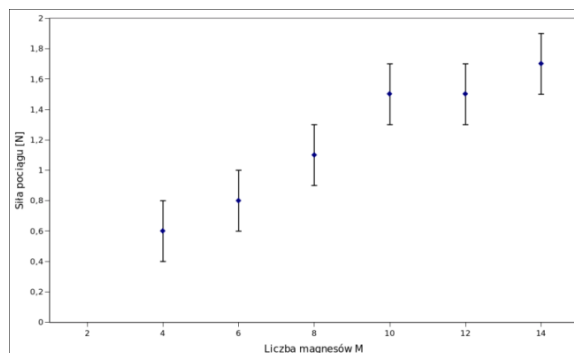


Rys. 15. Średnia prędkość graniczna pociągu w zależności od liczby magnesów M

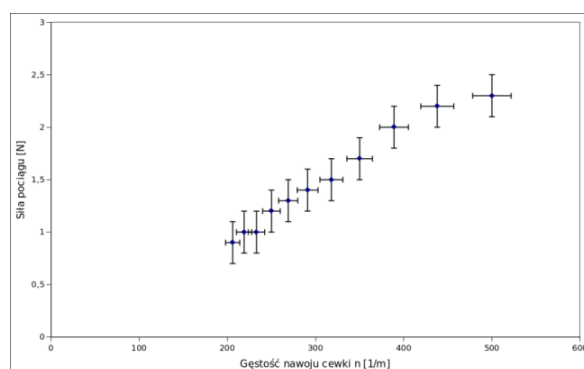


Rys. 16. Średnia prędkość graniczna pociągu w zależności od gęstości nawoju cewki n

Na duży rozrzut wyników dla $n = 500$ miała wpływ również ograniczona widoczność pociągu spowodowana tym, że przerwy między zwojami cewki są dla tej gęstości mniejsze niż 1 mm. Siła F działająca na pociąg rośnie wraz ze wzrostem M (rys. 17) oraz n (rys. 18).



Rys. 17. Siła F działająca na pociąg w zależności od liczby magnesów M



Rys. 18. Siła F działająca na pociąg w zależności od gęstości nawoju cewki n

Średnia moc pociągu (rys. 19 i 20) w trakcie ruchu z prędkością graniczną została obliczona dla każdej sytuacji jako iloraz siły działającej na pociąg oraz średniej prędkości granicznej:

$$P = vF .$$

Całkowita niepewność standardowa pomiaru mocy pociągu P wynosi:

$$u(P) = \sqrt{u_A^2(P) + u_B^2(P)} .$$

Niepewność typu A:

$$u_A^2(P) = t_{p,k-1}^2 \frac{(v_1 F - \bar{v} F)^2 + \dots + (v_s F - \bar{v} F)^2}{k(k-1)} = u_A^2(v) F^2 ,$$

gdzie:

$t_{p, k-1}$ – współczynnik Studenta dla poziomu ufności $p = 0,9$ i stopni swobody $k-1 = 4$, $t_{p, k-1} = 2,1318$ [1]

Niepełność typu B:

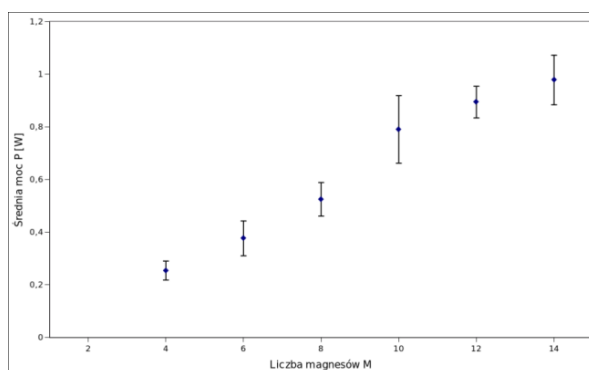
$$u_B^2(P) = \frac{\left(\frac{\partial P}{\partial F}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{\partial P}{\partial x}\right)^2 u^2(x) + \left(\frac{\partial P}{\partial t}\right)^2 u^2(t)}{3},$$

$$u_B^2(P) = \frac{\left(\frac{x_c}{\bar{t}_c}\right)^2 u^2(F) + \left(\frac{F}{\bar{t}_c}\right)^2 u^2(x_c) + \left(-\frac{Fx_c}{\bar{t}_c^2}\right)^2 u^2(\bar{t}_c)}{3}.$$

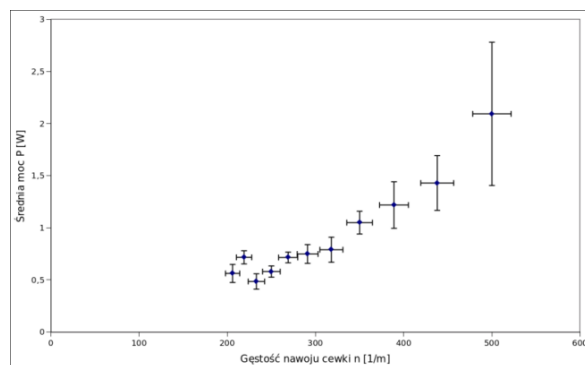
Pomiar F został wykonany raz, dlatego:

$$u^2(F) = \frac{\Delta F^2}{3},$$

gdzie: ΔF – niepewność maksymalna pomiaru F , $\Delta F = 0,2$ N.



Rys. 19. Moc pociągu P w zależności od liczby magnesów M



Rys. 20. Moc pociągu P w zależności od gęstości nawoju cewki n

4. Wnioski

Niewątpliwym sukcesem Zespołu Badawczego Equestira jest zbudowanie w pełni funkcjonalnego pociągu magnetycznego i zrozumienie zasady jego działania. Zadanie to wymagało dokonania licznych prób z wykorzystaniem magnesów różnych rodzajów, kształtów i rozmiarów oraz baterii wyprodukowanych przez kilku producentów. Ze względu na inną technikę wyłaczania biegunów dodatnich baterii, nie wszystkie ogniwa nadają się do budowy pociągu. Przykładowo baterie marki Energizer mają lekko zaokrąglony czubek bieguna dodatniego, przez co przymocowany do nich magnes nie jest stabilny, natomiast baterie marki Warta mają płaskie bieguny. Konieczne było również przetestowanie wszystkich możliwych kombinacji ułożeń magnesów i baterii.

Dzięki obecności siły magnetycznej wynikającej z reguły Lenza, pociąg bardzo szybko osiąga prędkość graniczną, a to z kolei pozwala na łatwe wyznaczenie jego mocy. Zastosowana metoda pomiaru opisana w artykule pozwoliła na potwierdzenie hipotezy istnienia prędkości granicznej oraz precyzyjne wyznaczenie jej wartości dla różnych sytuacji.

Zakres możliwych do zbadania gęstości nawoju zwojnicy jest ograniczony przez własności samego drutu. Gdy zwojnica została ściśnięta bardziej niż do 0,7 m, obserwacja pociągu w jej wnętrzu nie była możliwa. Co więcej, mocno ściśnięta zwojnica z nieizolowanego drutu, której zwoje stykają się, przestaje zachowywać się jak zwojnica, a zaczyna zachowywać się jak rura, gdyż elektrony mogą przepływać swobodnie między stykającymi się zwojami. Z kolei rozciągnięcie jej na długość większą niż 1,7 m spowodowałoby jej trwałe odkształcenie. Oprócz tego, silnie rozciągnięta zwojnica nie odkształca się równomiernie. Pojawiają się w niej obszary większego i mniejszego zagęszczenia zwojów. Przykładowo, dla długości 1,7 m w miejscu największego zagęszczenia odległość między zwojami badanej zwojnicy wynosiła 4 mm, natomiast w miejscu największego rozrzedzenia było to aż 8 mm. Z powodu ręcznego nawijania, badana zwojnica posiadała wiele defektów mogących wpływać na pomiary.

Najtrudniejszym elementem projektu było utrzymywanie w trakcie testów stałego napięcia i temperatury baterii. W trakcie rozładowywania SEM baterii oraz jej opór wewnętrzny zmieniają się w nieregularny sposób. Co więcej, bateria bardzo szybko rozgrzewa się, kiedy zasila pociąg, natężenie prądu płynącego przez układ może wynosić nawet 4 A, a najwięcej ciepła w układzie wydziela się na oporze wewnętrznym baterii. Ze względu na brak możliwości kontroli napięcia między biegunami baterii i jej oporu wewnętrznego, zbadanie wpływu natężenia prądu płynącego przez baterię na prędkość i moc pociągu jest praktycznie niemożliwe. Intuicyjne jest jednak, że im większe będzie napięcie między biegunami baterii, tym szybciej pociąg będzie jeździł. Poniżej pewnej granicznej wartości napięcia na baterii pociąg nie ruszy z miejsca, gdyż siła magnetyczna działająca nań będzie zbyt mała.

Zwiększanie gęstości nawoju zwojnicy, jak i liczby magnesów powoduje wzrost siły magnetycznej pomiędzy pociągiem a zwojnicą w stanie bezruchu. W przypadku zwiększenia M jest to spowodowane przez superpozycję pól magnetycznych połączonych magnesów, a w przypadku zwiększenia n – wzrostem indukcyjności zwojnicy. Wzrost jednak tych parametrów sprawia również, że podczas ruchu na pociąg działa większa siła oporu.

Ciekawym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonego projektu jest to, że zwiększanie mocy pojazdu w sytuacji, gdy mamy do czynienia z występowaniem siły oporu zależnej od prędkości, nie przekłada się wprost na zwiększenie maksymalnej prędkości pojazdu. Z identyczną sytuacją mamy do czynienia w przypadku prawdziwych maszyn, jak samochody, samoloty, statki czy lokomotywy.

Zasługującymi na uwagę zagadnieniami, które nie zostały zbadane przez Zespół Badawczy Equestira, są: wpływ średnicy cewki na działanie pociągu oraz wpływ średnicy użytego drutu. Ciekawym tematem do badania byłyby również pociągi zbudowane z kilku baterii przekładanych magnesami neodymowymi.

Nie udało się wyprowadzić matematycznej formuły, która pozwoliłaby na określenie prędkości granicznej ani mocy magnetycznego pociągu w zależności od jego istotnych parametrów. Siła działająca na dwa bieguny magnetyczne może być z powodzeniem obliczona przy wykorzystaniu tak zwanego prawa Coulomba dla magnetyzmu. Działa ono jednak tylko wtedy, gdy mamy do czynienia z dwoma magnesami stałymi oddalonymi od siebie na dużą odległość. W przypadku, gdy mamy do czynienia z dwoma zestawami magnesów poruszającymi się wewnątrz zwojnicy i wytwarzającymi w niej SEM indukcji, określenie wzoru na siłę magnetyczną działającą na pociąg okazało się zbyt skomplikowane. Z tego powodu część teoretyczna publikacji zawiera jedynie opis jakościowy, a nie ilościowy, zjawisk magnetycznych zachodzących w trakcie ruchu pociągu.

Literatura

- [1] Agnieszka Korgul, *Analiza danych pomiarowych wersja trzecia, uzupełniona. Materiały pomocnicze dla studentów Wydziału Chemii UW*
- [2] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Podstawy Fizyki 3*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 2014
- [3] Lenz's Law (the parent / child relationship) <http://regentsprep.org/regents/physics/phys08/clenslaw/>
- [4] Henryk Szydłowski, *Międzynarodowe normy oceny niepewności pomiarów*, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań