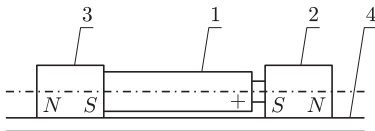


## Rewelacyjnie prosty silnik elektryczny

Stanisław BEDNAREK

Czytelnicy *Delty* zapewne pamiętają serię artykułów o bardzo prostych i pomysłowych silnikach elektrycznych. Najprostszy z nich składał się z małego magnesu, baterii, kawałka drutu i gwoździa (*Delta* 1/2012). Ktoś powiedziałby, że już prościej się nie da, a jednak! Dziś zachęcamy do zbudowania i eksperymentów z zadziwiająco prostym silnikiem elektrycznym, który nie tylko będzie wykonywał ruch obrotowy, ale również się toczył.

Do zbudowania silnika potrzebne będą: kawałek folii aluminiowej o rozmiarach około  $10 \times 20$  cm, okrągła bateria typu „paluszek” (najlepiej alkaliczna i jeszcze nieużywana) oraz dwa magnesy neodymowe w kształcie walca o średnicy nieco większej niż średnica baterii i długości 10–15 mm. Magnesy można kupić w sklepach z artykułami elektronicznymi (lub przez internet) – ich cena wynosi kilka złotych za sztukę.



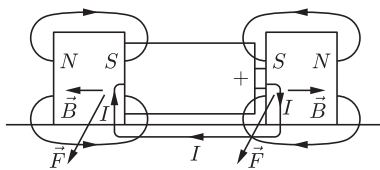
Rys. 1. Sposób zestawienia elementów silnika; 1 – bateria typu „paluszek”, 2, 3 – walcowe magnesy neodymowe, 4 – folia aluminiowa, N, S – bieguny magnesów.



Jeden ze zbudowanych silników.

Żeby zbudować, a właściwie zestawić nasz silnik, wystarczy przyłożyć płaskie ściany magnesów do obu końców baterii i umieścić ją na kawałku folii, leżącej na poziomej powierzchni (rys. 1). Dla prawidłowego działania silnika należy spełnić dwa warunki: magnesy muszą być skierowane do baterii biegunami jednoimiennymi i przyłożone do niej współosiowo. Żeby spełnić pierwszy warunek, przed przyłożeniem magnesów zbliżamy je płaskimi stronami i sprawdzamy, czy się odpychają. Dla spełnienia drugiego warunku sprawdzamy wzrokowo, czy brzeg każdego z magnesów wystaje tyle samo poza brzeg baterii. Ponadto folia powinna być gładka i leżeć na dokładnie poziomej powierzchni z dala od wszelkich przedmiotów ferromagnetycznych.

Gdy tak przygotowaną baterię z magnesami położymy na folii, wówczas ze zdumieniem zauważymy, że zaczyna się ona toczyć. Spróbujmy odpowiedzieć na pytanie, dlaczego tak się dzieje i od czego zależy kierunek tego ruchu? W tym celu pomocny będzie rysunek 2. Magnesy neodymowe pokryte są ochronną warstwą niklu, który dobrze przewodzi prąd elektryczny. Folia aluminiowa, chociaż w powietrzu pokrywa się cienką warstewką tlenku, to również jest niezłym przewodnikiem. Magnesy neodymowe są przyciągane do stalowej obudowy baterii i kontaktują się z jej biegunami. Gdy położymy baterię z magnesami na folii, to wówczas zamknie się obwód elektryczny i prąd popłynie od dodatniego bieguna baterii przez stykający się z nim magnes i folię znajdującą się pod baterią do magnesu, dotykającego ujemnego bieguna baterii. Prąd ten rozplywa się po powierzchni magnesów i folii. Jego gęstość jest jednak największa wzdłuż linii o najmniejszym oporze elektrycznym. Dlatego z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że przepływ prądu odbywa się radialnie przez magnesy do miejsc ich kontaktu z folią. Ponieważ kierunek namagnesowania magnesów jest osiowy, to płynący w nich radialnie prąd jest prostopadły do kierunku ich wektora indukcji magnetycznej  $\vec{B}$ . W tej sytuacji na magnesy działają siły elektrodynamiczne  $\vec{F}$ , skierowane stycznie do podstawy walca. Siły te dają momenty sił względem punktów kontaktu magnesów z folią. Pod działaniem tych momentów zachodzi obrót magnesów wraz z baterią i ich toczenie się po folii. Kierunek ruchu baterii zależy od wzajemnej orientacji przestrzennej biegunów magnesów i baterii (rys. 2).



Rys. 2. Wyjaśnienie zasady działania silnika;  $\vec{B}$  – indukcja pola magnetycznego,  $I$  – natężenie prądu,  $\vec{F}$  – siła elektrodynamiczna, N, S – bieguny magnesów.

Gdy do baterii przyłożone zostaną północne bieguny magnesów N (czyli odwrotnie niż na rysunku), albo gdy dodatni biegun baterii znajdzie się po lewej stronie, bateria potoczy się w przeciwnym kierunku.

Spróbujemy teraz oszacować moment sił elektrodynamicznych, działających na baterię oraz moc i sprawność naszego silnika. Siła elektrodynamiczna  $F$  wyraża się wzorem

$$(1) \quad F = BIl,$$

w którym  $B$  oznacza indukcję pola magnetycznego,  $I$  – natężenie prądu, a  $l$  – długość przewodnika. Dla zastosowanych magnesów neodymowych wartość  $B$  zmierzono miernikiem hallotronowym, otrzymując 0,22 T. Ze względu na bardzo mały opór warstwy niklu na magnesach i folii bateria pracuje praktycznie w stanie zwarcia. W tej sytuacji natężenie prądu  $I$  można zmierzyć przyłączonym do niej bezpośrednio amperomierzem, którego opór również pomijamy. Pomiar taki dał wynik 4,6 A. Jako  $l$  przyjęto promień magnesu  $r$  wynoszący 5 mm, czyli 0,005 m.

\*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki

Stąd obliczono  $F = 5,1 \cdot 10^{-3}$  N. Jest to bardzo mała wartość – dla porównania ciężar jednego kg to 9,81 N. Dlatego też ruch naszego silnika zatrzymuje małe nachylenie powierzchni, na której leży folia albo jej niewielkie nierówności. Całkowity moment sił elektrodynamicznych  $M$ , napędzający silnik obliczamy ze wzoru

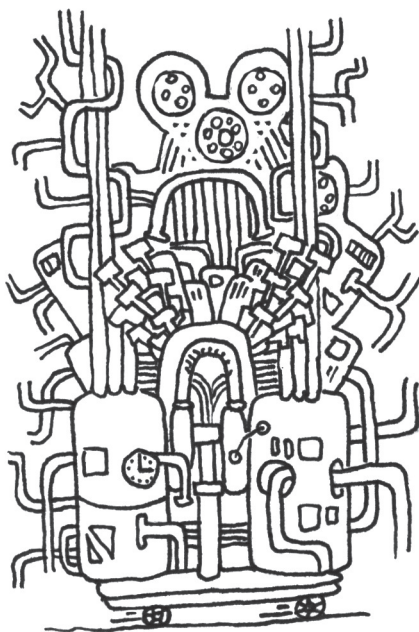
$$(2) \quad M = 2 \int_0^r l dF = 2 \int_0^r l B I dl = 2BI \int_0^r dl = BIr^2.$$

Po podstawieniu wcześniej przyjętych wartości ze wzoru (2) dostajemy  $M = 2,5 \cdot 10^{-5}$  Nm.

Ponieważ bateria z magnesami toczy się, czyli jednocześnie wykonuje ruch obrotowy i postępowy, to obliczając moc użyteczną silnika  $P_u$ , musimy uwzględnić te dwa ruchy. Stąd też i ze znanych z podstaw mechaniki wzorów piszemy wzór

$$(3) \quad P_u = Fv + M\omega,$$

gdzie symbol  $\omega$  we wzorze (3) oznacza prędkość kątową baterii, która jest związana z jej prędkością liniową zależnością  $\omega = v/r$ . Zakładając, że ruch baterii szybko staje się jednostajny, prędkość liniową  $v$  obliczono ze wzoru  $v = s/t$ . Stąd też, po uprzednim zmierzeniu czasu jej ruchu  $t$  na drodze  $s$ , otrzymano  $v = 0,04$  m/s. Po podstawieniu tej wartości oraz wartości wcześniej obliczonych do wzoru (3) uzyskano  $P_u = 3 \cdot 10^{-4}$  W. Moc dostarczona do silnika  $P_d$  to moc prądu elektrycznego płynącego z baterii. Obliczymy ją ze wzoru  $P_d = UI$ , w którym  $U$  to napięcie zmierzone na biegunach baterii i równe w przybliżeniu jej sile elektromotorycznej. Dla użytej baterii  $U = 1,54$  V. Uwzględniając ten wynik oraz wcześniej zmierzoną wartość  $I$ , mamy  $P_d = 7,1$  W. Na koniec możemy obliczyć sprawność silnika  $\eta = P_u/P_d$ . Po podstawieniu wcześniejszych wyników otrzymujemy  $\eta = 4,2 \cdot 10^{-5} = 0,0042\%$ . Jak widać, sprawność naszego silnika jest bardzo mała. Większość energii elektrycznej zamienia się na ciepło, co łatwo pocujemy własnymi palcami już po kilkudziesięciu sekundach użytkowania silnika. Wniosek końcowy jest taki, że z powodu bardzo małej sprawności nasz silnik chyba nie znajdzie praktycznego zastosowania, ale za to na pewno jest fascynującą zabawką edukacyjną.



## Zadania

Redaguje Urszula PASTWA

**M 1513.** Jednym z pierwiastków wielomianu  $w$  o współczynnikach całkowitych jest liczba  $\frac{p}{q}$ , gdzie  $p$  i  $q$  są względnie pierwszymi liczbami całkowitymi. Wykazać, że liczba  $w(1)$  jest podzielna przez  $p - q$ .

Rozwiązanie na str. 2

**M 1514.** Każda z liczb 1, 2, 3, ..., 10 została wpisana na dziesięciu polach szachownicy  $10 \times 10$  w taki sposób, że na każdym polu jest dokładnie jedna liczba. Wykazać, że istnieje wiersz lub kolumna tej szachownicy, w której występują co najmniej 4 różne liczby.

Rozwiązanie na str. 17

**M 1515.** Znaleźć obwód  $p$  trójkąta o wysokościach długości 2, 3 i 4.

Rozwiązanie na str. 4

Przygotował Michał NAWROCKI

**F 917.** Na powierzchni stołu stoi, szczelnie do niej przylegając, półsferyczny dzwon. Do dzwonu, poprzez otwór w jego wierzchołku, wlewana jest woda. Gdy poziom wody dochodzi do otworu, woda unosi dzwon i zaczyna wyciekać dołem spod dzwonu. Znaleźć masę dzwonu, jeżeli jego promień wynosi  $R$ , a gęstość wody wynosi  $d$ .

Rozwiązanie na str. 23

**F 918.** Dwie małe bańki mydlane o promieniach  $r_1$  i  $r_2$  łączą się w jedną bańkę o promieniu  $r_3$ . Przyjmując, że napięcie powierzchniowe błonki mydlanej wynosi  $\sigma$ , a temperatura  $T$  jest jednakowa dla wszystkich rozpatrywanych baniek i równa temperaturze otaczającego powietrza, znaleźć ciśnienie atmosferyczne.

Rozwiązanie na str. 23

