

## Doświadczenia z silnikami unipolarnymi<sup>1</sup>

Tomasz Bednarek, Publiczne Gimnazjum nr 1, im. Króla  
Bolesława Chrobrego w Łodzi  
Stanisław Bednarek, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Łódzkiego

### Streszczenie

W początkowej części artykułu opisano krótko znane z literatury koło Barlowa, jako przykład silnika elektrycznego unipolarnego, czyli jednobiegunowego. W następnych częściach przedstawione zostały przykłady budowy takiego silnika przy użyciu współcześnie dostępnych przedmiotów i materiałów codziennego użytku, takich jak: okrągłe baterie, magnes neodymowy, kawałek miedzianego drutu, gwoździe stalowy oraz aluminiowe puszkę od napojów i dezodorantów. Opisane zostały silniki wykonane z wymienionych przedmiotów, w których elementami wirującymi są: magnes neodymowy, bateria, druciana ramka oraz aluminiowe puszkę. Podano wskazówki techniczne oraz wyjaśnienie zasady działania zbudowanych silników. Przykłady te są bardzo proste w realizacji i dają widowiskowy efekt. Ponadto dobrze nadają się do stworzenia sytuacji problemowej, zachęcającej osoby oglądające te silniki do lepszego zrozumienia praw fizyki.

### Wstęp

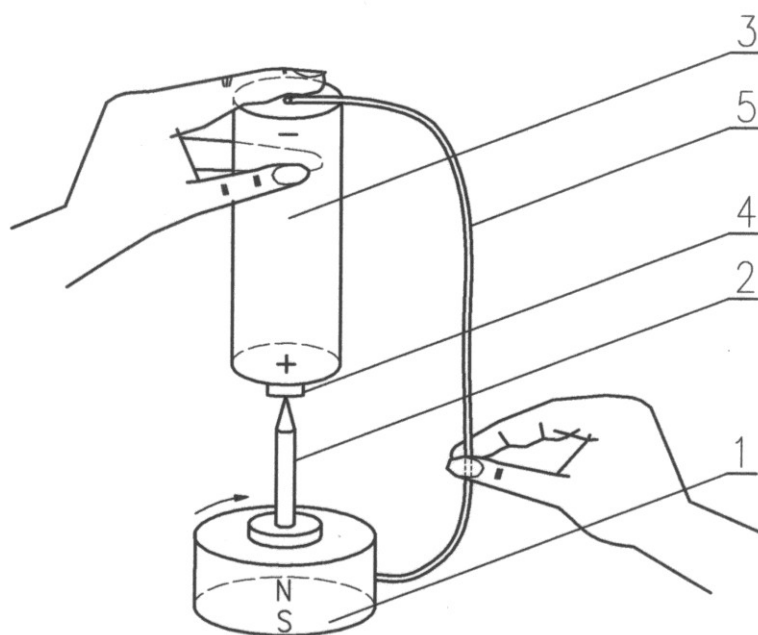
Jednym z najstarszych i najprostszych unipolarnych silników elektrycznych jest koło Barlowa. Klasyczna wersja tego koła, opisana w literaturze składa się z przewodzącego prądu elektrycznego dysku, wykonanego z materiału nieferromagnetycznego [1, 2]. Dysk ten osadzony został na również przewodzącej osi i może obracać się z małym tarcie. Prostopadle do płaszczyzny dysku przyłożone jest stałe pole magnetyczne. Do brzegu dysku i do osi dotykają dwa sprężyste kontakty, które przyłączane są do źródła stałego napięcia elektrycznego. W wyniku tego, przez dysk przepływa prąd w kierunku radialnym. Ponieważ przepływający prąd znajduje się w prostym do niego polu magnetycznym, to na dysk działają siły elektrodynamiczne, skierowane stycznie do obwodu koła. Moment tych sił powoduje obrót dysku.

Zmiana kierunku przepływu prądu, albo zwrotu wektora indukcji przyłożonego pola magnetycznego powoduje odwrócenie kierunku obrotu dysku. Wzrost natężenia prądu lub wartości indukcji powoduje z kolei zwiększenie szybkości obrotów dysku. W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych brzeg dysku był zanurzony w niewielkim naczyniu z rtęcią, do której przyłączano jeden biegun źródła zasilania. Zapewniało to dobry kontakt elektryczny przy dość dużych natężeniach prądu, potrzebnych do spowodowania obrotu dysku.

Koło Barlowa, podobnie jak inne silniki unipolarne, nie znalazło szerszego zastosowania do napędu maszyn i urządzeń. Rozwój napędów elektrycznych poszedł w kierunku budowy silników, zawierających uzwojenia nawinięte na ferromagnetyczne rdzenie. Obecnie koło Barlowa jest czasem używane w specjalnych układach napędowych lub w prądnicach, które muszą pracować przy niskim napięciu i dużym natężeniu prądu. W ostatnich latach, wśród przedmiotów codziennego użytku pojawiły się okrągłe baterie, a właściwie ogniwa, zamknięte w osłonie z blachy stalowej oraz silne magnesy neodymowe, pokryte przewodzącą warstwą niklu i aluminiowe puszkę, stosowane jako opakowania wielu napojów i dezodorantów. Przedmioty te pozwalają w bardzo prosty i tani sposób zbudować interesujące modele unipolarnych silników elektrycznych, stanowiące współczesne wersje koła Barlowa. W dalszych częściach prezentacji pokazane zostaną przykłady takich modeli.

## Silnik z wirującym magnesem

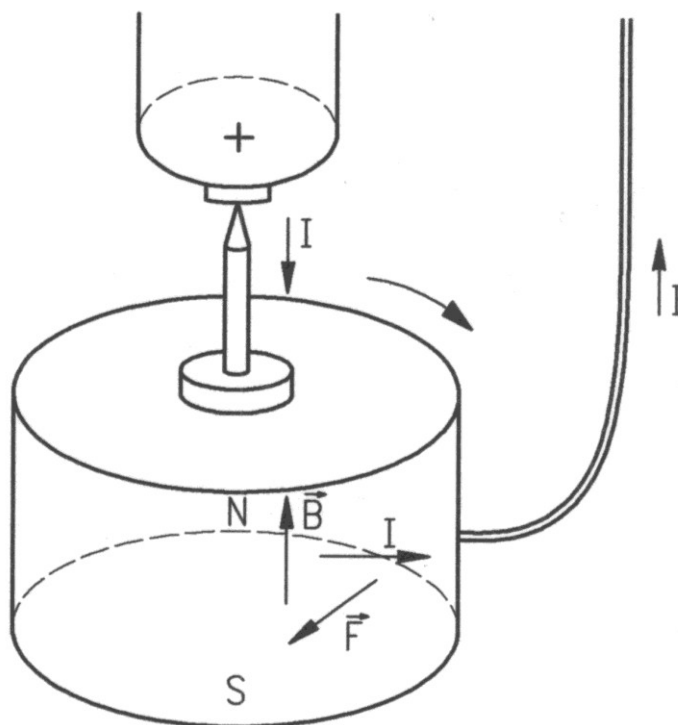
Do zbudowania silnika potrzebne są: magnes neodymowy w kształcie walca o średnicy 1-2 cm i wysokości ok. 1 cm pokryty warstwą niklu, bateria typu R6 w osłonie stalowej, kawałek pojedynczego, giętkiego przewodu z odizolowanymi końcami o długości 10-15 cm, stalowy gwóźdź lub wkręt o długości ok. 5 cm. Płaską stronę łebka gwoźdźka należy przyłożyć do środka płaskiej powierzchni walcowego magnesu. W wyniku przyciągania gwóźdź zostanie silnie połączony z magnesem, rys. 1. Z kolei ostrze gwoźdźka przykładają się do jednego z biegunów baterii. Dzięki stalowej osłonie gwóźdź zostanie przyciągnięty również do baterii. Drugi koniec baterii należy przytrzymać palcami jednej ręki i przycisnąć do niego odizolowany koniec przewodu. Magnes i gwóźdź zwisają przy tym pionowo utrzymywane przez siły przyciągania magnetycznego. Pozostały, odizolowany koniec przewodu należy ująć palcami drugiej ręki i przyłożyć go do bocznej powierzchni magnesu. Okazuje się wówczas, że magnes wraz z gwoździem zaczyna się obracać wokół ich pionowej osi.



Rys. 1. Budowa silnika z wirującym magnesem; 1 – magnes neodymowy, 2 – gwóźdź stalowy, 3 – bateria typu R6, 4 – dodatni biegun baterii, 5 – giętki przewód

Zaobserwowany obrót magnesu można wyjaśnić w następujący sposób, rys. 2. Od bieguna ogniwa, stykającego się z gwoździem płynie prąd elektryczny wzdłuż gwoźdźka do środka magnesu, a następnie w kierunku radialnym przez magnes do końca przewodu, stykającego się z boczną powierzchnią magnesu. Dalej prąd płynie przewodem do drugiego bieguna baterii. W ten sposób przez niklową powłokę magnesu neodymowego zamyka się obwód elektryczny. Prąd płynący radialnie przez magnes znajduje się w polu magnetycznym, wytwarzanym przez ten sam magnes. Kierunek wektora indukcji tego pola jest pionowy, czyli prostopadły do kierunku prądu. W tej sytuacji, na magnes działa siła elektrodynamiczna skierowana poziomo i stycznie do obwodu magnesu. Moment tej siły wprawia magnes w ruch obrotowy. Odwrócenie magnesu, tak żeby jego drugi biegun stykał się z łebkiem gwoźdźka, powoduje zmianę kierunku obrotu magnesu na przeciwny. Ten sam efekt daje zamiana bieguna baterii, stykającego się z ostrzem gwoźdźka. Szybkość obrotu magnesu zależy ponadto od miejsca przyłożenia końca przewodu do bocznej powierzchni magnesu i jest największa, gdy koniec dotyka tej powierzchni w połowie wysokości magnesu. Zamiast gwoźdźka można też użyć wkrętu z ostrym końcem – wów-

czas ruch obrotowy będzie lepiej widoczny. Można także zastosować większą baterię, np. R14 lub R20. Baterie te mają mniejszy opór wewnętrzny i zapewniają przepływ prądu o większym natężeniu, co skutkuje szybszym obrotem magnesu. Doświadczenie udaje się też z mniejszą baterią typu R3.



Rys. 2. Wyjaśnienie zasady działania silnika z wirującym magnesem;

$I$  – natężenie prądu,  $\vec{B}$  – indukcja pola magnetycznego

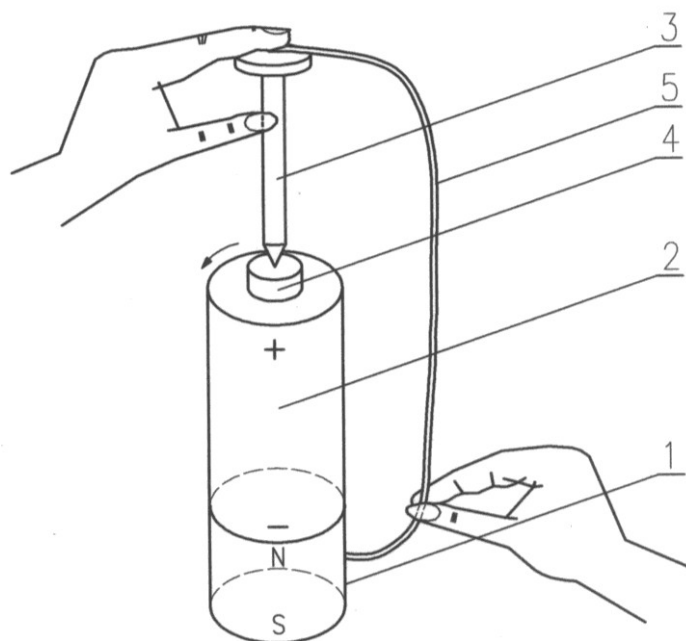
$\vec{F}$  – siła elektrodynamiczna.

Zamiast magnesu neodymowego można użyć walcowego magnesu ferrytowego, ale wówczas należy do starannie owinąć cienką folią aluminiową, która umożliwi przepływ prądu po powierzchni magnesu. Wkręt lub gwóźdź nie powinny być zbyt długie, a ich pole przekroju poprzecznego zbyt małe, ponieważ wtedy będą one za słabo przyciągane do stalowej osłony baterii i nie utrzymają ciężaru magnesu. Podczas obrotu magnesu ulega on lekkiemu kołysaniu na boki i koniec przewodu nie przez cały czas dotyka bocznej powierzchni magnesu. Mimo tego, dzięki bezwładności magnes stale się obraca. Podczas obrotu magnesu indukuje się w nim siła ponderomotoryczna, skierowana przeciwnie do siły elektromotorycznej baterii. W wyniku tego, natężenie prądu płynącego przez magnes ulega zmniejszeniu i zostaje osiągnięty stan równowagi, zapobiegający rozbieganiu się silnika. Mimo tego bateria pracuje prawie na zwarciu i płynie przez nią znaczny prąd elektryczny, o natężeniu dochodzącym nawet do kilku amperów. Powoduje to odczuwalne podczas dotyku nagrzewanie się elementów silnika i szybkie zużycie baterii.

Żeby zapobiec zbaczaniu ostrza gwoźdźka ze środka biegunów baterii, co zdarza się podczas szybkich obrotów silnika, korzystne jest wykonanie na środku tych biegunów niewielkich wgłębień. W tym celu wystarczy ustawić nieco stępiony czubek punktaka w środku bieguna i lekko uderzyć w koniec punktaka młotkiem. Należy przy tym uważać, żeby nie przebić stalowej osłony baterii, gdyż w przypadku baterii alkalicznej, spowodowałoby to wypływ elektrolitu i jej zniszczenie. Wykonanie takich wgłębień w biegunach baterii jest korzystne również przy budowie silników opisanych w dalszych częściach tego artykułu.

### Silnik z wirującą baterią

Ten silnik zbudowany jest z tych samych elementów, co poprzednio opisany, ale są one inaczej usytuowane względem siebie, rys. 3. Dzięki temu, bateria w tym silniku obraca się wraz z magnesem, a gwóźdź pozostaje nieruchomy. Zastosowana konfiguracja elementów nie jest znana z dostępnej literatury i została zaproponowana przez pierwszego ze współautorów niniejszego artykułu. W celu zbudowania tego silnika płaską powierzchnię magnesu neodymowego należy przyłożyć do jednej z płaskich powierzchni baterii w osłonie stalowej. Do przeciwległej powierzchni baterii trzeba przyłożyć ostrze gwoździa. Trzymając palcami za łebek gwoździa i unosząc go do góry sprawdza się, czy bateria z magnesem nie odpada od gwoździa. Gdyby odpadała, wówczas należy użyć silniejszego magnesu lub krótszego gwoździa o większym polu przekroju poprzecznego. Należy dodać, że bateria z magnesem łatwiej utrzymuje się, gdy do łebka gwoździa przyłożony jest jej szerszy koniec, stanowiący biegun ujemny. Do trzymanego palcami łebka gwoździa przykładają się odizolowany koniec giętkiego przewodu i dociska palcem. Pozostały, odizolowany koniec przewodu należy ująć palcami drugiej ręki i przyłożyć do bocznej powierzchni magnesu neodymowego. W tej sytuacji obserwowany jest obrót magnesu wraz z baterią. Zasada działania tego silnika jest taka sama, jak poprzednio opisanego. Takie same uwagi dotyczą również zmian kierunków jego obrotów i możliwości użycia innych typów baterii.



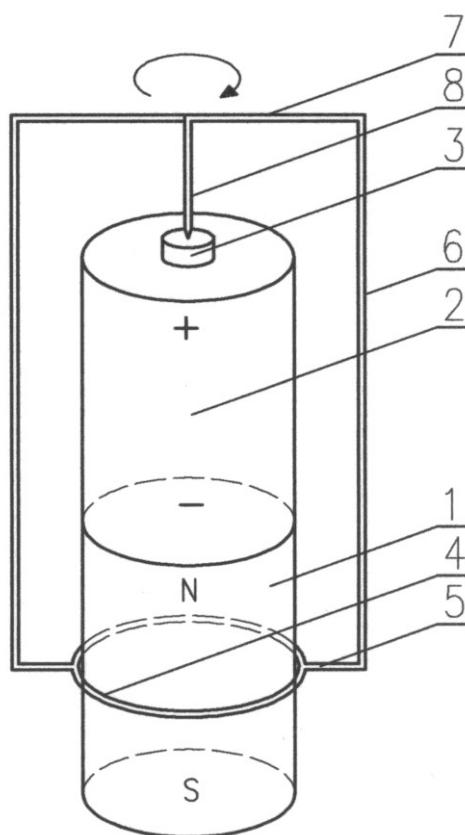
Rys. 3. Budowa silnika z wirującą baterią; 1 – magnes neodymowy, 2 – bateria typu R6, 3 – gwóźdź stalowy, 4 – dodatni biegun baterii, 5 – giętki przewód.

### Silniki z wirującymi ramkami

Źródłem pola magnetycznego w tych silnikach jest walcowy magnes neodymowy 1, pokryty ochronną warstwą niklu, rys. 4. Średnica magnesu równa się lub jest większa, niż średnica baterii 2, która zostanie tutaj użyta. Można z powodzeniem zastosować każdą z wymienionych wcześniej okrągłych baterii, a więc typu R6, R14 lub R20. Wysokość magnesu powinna wynosić 1 cm lub więcej. Na tym magnecie ustawia się współosiowo wybraną baterię 2 w osłonie stalowej, dzięki temu zostaje ona silnie przyciągnięta do magnesu. Baterię można ustawić zarówno biegunem dodatnim 3 ku górze, jak też odwrotnie. Ruchomym elementem w tym silniku jest ramka wykonana z nieferromagnetycznego drutu o średnicy ok. 1 mm. Może to być drut miedziany, mosiężny lub drut

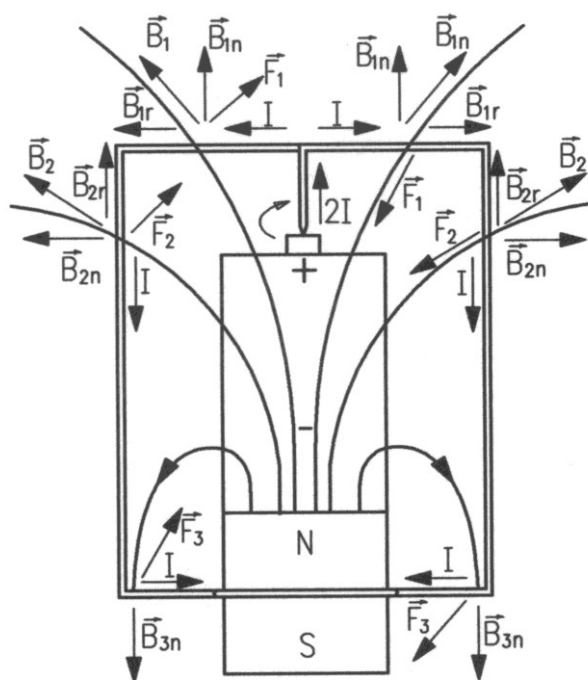
miedziany pokryty cienką warstwą srebra, używany w elektronice, tzw. srebrozanka. Druły z tych materiałów łatwo dają się wyginać i lutować.

W ramce można wyróżnić kilku charakterystycznych elementów. U dołu ramka ma pierścień 4 o średnicy wewnętrznej nieco większej niż, średnica magnesu. Pierścień ten uzyskuje się przez wygięcie drutu na magnesie owiniętym kilku warstwami papieru w celu zwiększenia średnicy pierścienia. Po przeciwnych stronach od pierścienia odchodzą wzdłuż jego średnicy dwa poziome odcinki drutu 5, które w pewnej odległości od baterii zagięte są pod kątem prostym ku górze tworząc pionowe odcinki 6, wystające ponad baterię. Nad baterią odcinki te są ponownie zagięte przechodzą w poziomy odcinek 7. W połowie długości ten ostatni odcinek ma jeszcze odgięty ku dołowi, pionowy fragment 8, który jest zaokrąglony na końcu i opiera się na biegunie baterii skierowanym do góry. W sumie ramka składa się z poziomego pierścienia, dotykającego bocznej powierzchni magnesu i pionowego prostokąta, otaczającego baterię. Całą ramkę można wygiąć ciągu kilku minut z jednego kawałka drutu i połączyć jej odcinki przez zlutowanie.



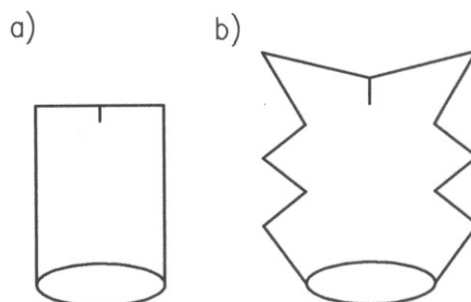
Rys. 4. Budowa silnika z wirującą ramką; 1 – magnes neodymowy, 2 – bateria typu R6, 3 – dodatni biegun baterii, 4 – pierścień ramki, 5 – dolny odcinek ramki, 6 – pionowy odcinek ramki, 7 – górny odcinek ramki, 8 – zaokrąglony koniec ramki.

Po nałożeniu ramki na baterię zaczyna się ona obracać. Kierunek obrotu ramki można odwrócić przez zmianę orientacji biegunów magnesu i baterii. Baterie o większych rozmiarach dają większe natężenie prądu i szybszy obrót ramki. Przyczyną obrotu ramki jest wypadkowy moment sił elektrodynamicznych, działających na poszczególne boki jej prostokątnej części, rys.5. Gdy ramka jest nałożona na baterię, wówczas prąd elektryczny płynie przez odgięty pionowy odcinek 8, a następnie rozgałęzia się na poszczególne boki prostokątnej części ramki i dopływa do pierścienia kontaktującego z boczną powierzchnią magnesu. Poprzez ochronną, przewodzącą warstwę niklu prąd dopływa do drugiego bieguna baterii.



Rys. 5. Wyjaśnienie oddziaływania ramki z polem magnetycznym;  $I$  – natężenie prądu,  $\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_3$  – wektory indukcji pola magnetycznego na poszczególnych bokach ramki,  $\mathbf{B}_{1n}, \mathbf{B}_{2n}, \mathbf{B}_{3n}$  – składowe wektorów indukcji prostopadłe do boków ramki,  $\mathbf{B}_{1r}, \mathbf{B}_{2r}$  – składowe wektorów indukcji równoległe do boków ramki,  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3$  – siły elektrodynamiczne działające na boki ramki.

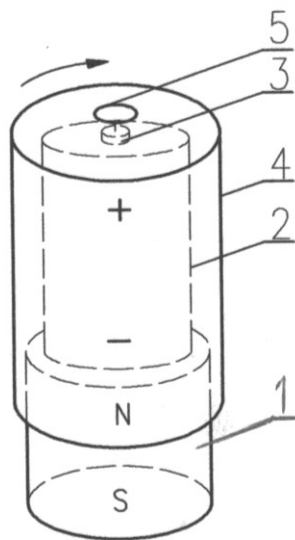
Każdy z odcinków prostokątnej części ramki, przewodzących prąd elektryczny znajduje się w polu magnetycznym, którego wektory indukcji mają w ogólnym przypadku kierunek ukośny do tego odcinka. Dzięki temu, każdy z tych wektorów ma składową prostopadłą do odpowiedniego odcinka. Ponieważ w tych odcinkach płynie prąd, to działają na nie siły elektrodynamiczne, skierowane obwodowo. Przyłożone do przeciwległych boków ramki siły mają zwroty przeciwne i takie same wartości, czyli stanowią pary sił. Powoduje to wytworzenie momentu sił obracającego ramkę. Ramka ulega kołysaniom i jej pierścień nie musi stale kontaktować z powierzchnią boczną magnesu, ponieważ w chwilach braku kontaktu uprzednio wprawiona w ruch ramka nadal będzie się obracała dzięki swej bezwładności. Podobnie jak w poprzednio opisanych modelach, bateria pracuje w stanie zwarcia i przepływający przez nią prąd o dużym natężeniu powoduje nagrzewanie elementów silnika oraz szybkie zużywanie się baterii. Pionowa część ramki nie musi mieć poziomych, dolnych odcinków 5, rys. 6.a. Część ta może mieć kształt inny niż prostokątny, np. trapezowy lub postać bardziej złożonego wielokąta, rys. 6.b.



Rys. 6. Przykłady różnych kształtów ramek; a) ramka prostokątna, b) ramka o bokach zygakowatych.

## Silniki z wirującymi puszkami

Zastosowanie w prezentowanych silnikach zamiast ramki z drutu, odpowiednio przygotowanych puszek jest własnym i nieznanym z dostępnej literatury pomysłem drugiego z autorów tego artykułu, rys. 7. W tych silnikach magnes neodymowy 1 i ustawiona na nim bateria 2, z biegunem dodatnim 3, skierowanym np. ku górze są takie same jak w poprzednio opisanych modelach. Na tę baterię nałożono odwróconą do góry dnem uciętą, aluminiową puszkę 4, która stanowiła opakowanie od dezodorantu. Średnica puszkę i długość jej odciętego fragmentu zostały tak dobrane, żeby wewnętrzna powierzchnia puszkę po nałożeniu na baterię dotykała bocznej powierzchni magnesu, zapewniając przez to dobry kontakt elektryczny. W celu zmniejszenia tarcia i lepszego utrzymania puszkę na osi układu, w środku jej dna została wbita pinezka 5 lub krótki gwóźdź.

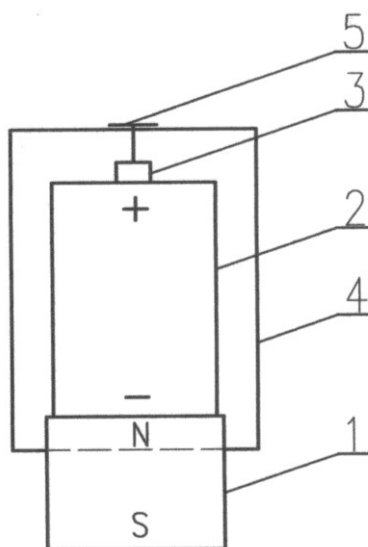


Rys. 7. Wygląd zewnętrzny silnika z obracającą się puszką; 1 – magnes neodymowy, 2 – bateria okrągła, 3 – dodatni biegun baterii, 4 – puszkę aluminiowa, 5 – pinezka.

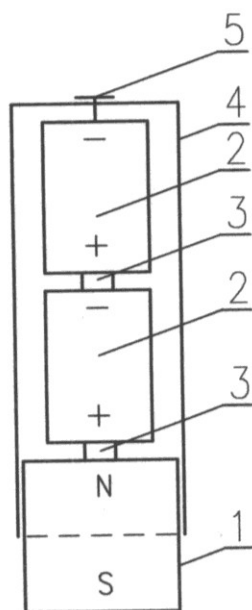
Po nałożeniu puszkę na magnes i baterię zaczyna się ona obracać. Zasada działania tej wersji silnika jest analogiczna, jak silników z ramkami. Prąd elektryczny płynie tutaj od bieguna baterii przez pinezkę, a następnie rozplywa się radialnie przez dno puszkę w kierunku jej bocznej powierzchni. Po tej powierzchni prąd płynie pionowo do dolnego brzegu puszkę, przez który dopływa do bocznej powierzchni magnesu i dalej do drugiego bieguna baterii. W obszarze denka puszkę i jej bocznej powierzchni istnieje prostopadła do nich składowa wektora indukcji magnetycznej pola wytwarzanego przez magnes. W wyniku tego, na puszkę działają skierowane obwodowo siły elektrodynamiczne, których moment powoduje obrót puszkę.

Oprócz puszek od dezodorantu o średnicy nieco większej, niż średnica magnesu do budowy silników wykorzystano z powodzeniem również aluminiowe puszkę do różnego rodzaju napojów, m.in. od napoju „Fanta” o pojemności 0,33 L, mniejsze puszkę od napojów energetyzujących o pojemności 0,2 L oraz puszkę od piwa o pojemności 0,5 L. W przypadku tych puszek, w ich dnie wycięto współśrodkowe otwory o średnicy nieco większej, niż średnica używanego magnesu neodymowego, rys.8. Użyto w tym celu nożyczek do paznokci o zakrzywionych końcach. Brzegi otworu wyrównano okrągłym pilnikiem. W środku pokrywki puszkę wbite pinezkę i tak przygotowaną puszkę nałożono na baterię ustawioną na magnesie neodymowym, rys.8. Do bocznej powierzchni magnesu dotykał wtedy brzeg otworu wyciętego w dnie puszkę. W przypadku wysokich puszek od piwa i napoju energetyzującego na magnesie umieszczano dwie baterie ustawione

jedna na drugiej. Bieguny baterii zostały tak zorientowane, żeby były one połączone szeregowo, rys.9. Zapewniało to dopasowanie połączonych baterii do wysokości puszk i powodowało zwiększenie natężenia prądu umożliwiające obrót cięższej puszk od piwa.



Rys. 8. Przekrój poprzeczny przez silnik z obracającą się puszką, oznaczenia elementów takie same, jak w opisie rys. 7.



Rys. 9. Przekrój poprzeczny przez złożony silnik z obracającą się puszką, oznaczenia elementów takie same, jak w opisie rys. 7.

### Zakończenie

Niektóre, atrakcyjne i kształcące doświadczenia pokazowe, opisane w książkach sprzed kilkudziesięciu lat zostały już prawie zapomniane. Często do tych doświadczeń były używane trudno dostępne lub zakazane obecnie substancje, jak choćby rtęć w znanych opisach koła Barlowa. Okazuje się jednak, że pojawienie się w naszym otoczeniu nowych materiałów, opakowań od różnych produktów, czy gadżetów, ułatwiających nam życie pozwala przeprowadzić te zapomniane i nieraz trudne kiedyś do wykonania doświadczenia w atrakcyjny i łatwy sposób. Opisane tutaj silniki unipolarne są dobrym tego przykładem. Zaprezentowanie ich w nowej formie stało się możliwe, dzięki łatwemu



dostępowi do silnych magnesów neodymowych, porytych zabezpieczającą je przed korozją warstwą niklu, zamknięciu baterii w stalowe osłony, chroniące urządzenia elektroniczne przed skutkami wycieku elektrolitu i powszechnemu stosowaniu aluminiowych puszek, jako opakowań do napojów i dezodorantów. Oczywiście, do tego wszystkiego potrzebne jest jeszcze trochę pomysłowości oraz zauważenie, że prawa fizyki mają uniwersalnych charakter i działają również wśród tych przedmiotów.

### Literatura

- [1]. S. Szczeniowski: Fizyka doświadczalna, Część III, Elektryczność i magnetyzm. PWN, Warszawa 1971.
- [2]. A. Piekara: Elektryczność i magnetyzm, PWN, Warszawa 1972.
- [3]. K. Gołębiowski, W. Peeters, G. Karwasz: Mikser z magnezem (na deser), „Foton, Pismo dla nauczycieli i studentów fizyki oraz uczniów”, Nr 104, s. 54 – 56, 2009.

---

<sup>i</sup> Doświadczenia z wykorzystaniem magnesów neodymowych, koła Barlowa były prezentowane na wcześniejszych spotkaniach OKDF (przyp. Red.).