

Kawalek drutu, bateria i magnes...

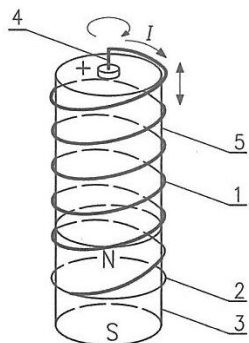
*Stanisław Bednarek
Uniwersytet Łódzki*

Wstęp

W wielu przypadkach do przeprowadzenia interesujących doświadczeń z fizyki nie potrzeba skomplikowanych i kosztownych przyrządów ani dużego nakładu pracy. Bardzo pouczające eksperymenty, których wyjaśnienie wymaga głębokiego zrozumienia i umiejętnego wykorzystania praw fizyki, można zrealizować używając łatwo dostępnych przyrządów i materiałów codziennego użytku. Przygotujmy więc dwa niewielkie magnesy neodymowe w kształcie walca o średnicy 12–14 mm i wysokości 10 mm pokryte ochronną warstwą niklu, używane do przytrzymywania kartek na tablicach i lodówkach [1]. Ponadto wykorzystamy okrągłe baterie, tzw. paluszki. Baterie te dla zabezpieczenia przed wylaniem się elektrolitu umieszczane są w szczelnych obudowach z blachy stalowej, co rozwiązuje problem przymocowania do nich magnesów. Najlepiej sprawdzą się baterie alkaliczne i wcześniej nieużywane. Średnica magnesów powinna być nieco większa niż średnica baterii. Potrzebne będą jeszcze: kilka metrów miedzianego drutu o średnicy ok. 0,5–1 mm (bez izolacji) i kawałek folii aluminiowej do pakowania produktów spożywczych. W dalszych częściach tego artykułu opisane zostaną trzy przykłady niezwykle prostych i interesujących doświadczeń przy użyciu wymienionych przedmiotów.

Silnik z oscylującym wirnikiem

Czytelnicy *Fotonu* zapewne znają bardzo proste silniki elektryczne, w których ramka z drutu obraca się wokół baterii typu „paluszek”, ustawionej na magnecie neodymowym w kształcie walca [2]. Zastąpmy w tym silniku ramkę przez spiralę śrubową. Budowę takiego silnika przedstawiają rys. 1 i fot. 1. Spirala 1 została zwinięta ręcznie z miedzianego drutu. Dolny koniec drutu tworzy pierścień kontaktowy 2, który dotyka bocznej powierzchni magnesu neodymowego 3. Górny koniec spirali 4, skierowany jest w stronę jej osi i zagięty w dół, tak żeby dotykał dodatniego bieguna baterii 5, ustawionej na magnecie neodymowym. Po nałożeniu spirali na magnes z baterią może pojawić się niespodziewany efekt – oprócz obrotu spirali zachodzą również jej oscylacje w kierunku pionowym.



Rys. 1. Budowa silnika z oscylującym wirnikiem; 1 – spirala z miedzianego drutu, 2 – pierścień kontaktowy, 3 – walcowy magnes neodymowy, 4 – górny koniec spirali, 5 – bateria, N, S – bieguny magnesu, I – natężenie prądu

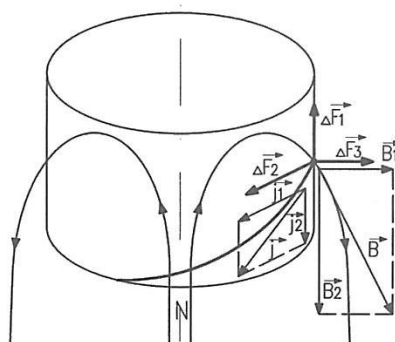


Fot. 1. Wygląd silnika z oscylującym wirnikiem

Dlaczego spirala wykonuje drgania? Najprostsze wyjaśnienie jest następujące. Spirala stanowi solenoid, przez który płynie prąd elektryczny, umownie od dodatniego bieguna baterii do ujemnego. Podczas tego przepływu na końcach solenoidu pojawiają się bieguny magnetyczne. Przy odpowiednim kierunku nawinięcia spirali i orientacji biegunów magnesu oraz baterii, na dolnym końcu spirali może pojawić się taki sam biegun, jak biegun magnesu zwrócony ku górze. Będą to więc bieguny jednoimienne, które się odpychają wzajemnie. Jeżeli siła tego odpychania i sztywność spirali będą odpowiednio duże, to spirala zostanie przesunięta ku górze i jej koniec 4 przestanie dotykać górnego bieguna baterii. Obwód elektryczny zostanie przerwany i przez spiralę przestanie płynąć prąd, a co za tym idzie, solenoid utraci swoje właściwości magnetyczne. Wtedy spirala opadnie pod własnym ciężarem i ponownie zamknie obwód. Dalej opisane procesy powtarzają się i powodują obserwowane drgania spirali w kierunku pionowym. Są to drgania o charakterze relaksacyjnym, charakteryzujące się narastaniem pewnej wielkości wraz z upływem czasu – w tym przypadku przesunięcia spirali. Następnie, po przekroczeniu wartości krytycznej i przerwaniu obwodu, następuje szybki powrót do pozycji początkowej. Zmiany te charakteryzują się zatem asymetrycznym przebiegiem w czasie. Pozostaje jeszcze wyjaśnienie, dlaczego zachodzi także dodatkowo obrót spirali? Wynika to z dwóch uwarunkowań. Pierwszym jest pewne nachylenie zwojów spirali do poziomu, a drugim zakrzywienie linii pola, wytwarzanego przez magnes i istnienie niezerowej składowej radialnej wektora i indukcji magnetycznej. Wskutek tego pojawia się siła elektrodynamiczna, skierowana stycznie do spirali, która powoduje jej obrót.

Spróbujmy jednak przyjrzeć się dokładniej, niejako w sposób „analityczny” temu, co dzieje się ze spiralą. W tym celu rozpatrzmy siły działające na element

zwoju umieszczony na baterii. Zgodnie z ogólnie przyjętą konwencją linie pola magnetycznego mają na zewnątrz magnesu zwrot od bieguna północnego do bieguna południowego, rys. 2. Rozkład przestrzenny linii pola ma symetrię osiową i linie te leżą w płaszczyznach przechodzących przez oś magnesu. Wektor indukcji magnetycznej \mathbf{B} jest w każdym punkcie pola magnetycznego styczny do tych linii.



Rys. 2. Wyjaśnienie zasady działania silnika z oscylującym wirnikiem; $\Delta\mathbf{F}_1$, $\Delta\mathbf{F}_2$, $\Delta\mathbf{F}_3$ – składowe siły elektrodynamicznej, działające na element zwoju spirali – odpowiednio: pionowa, styczna i radiana, \mathbf{B} – wektor indukcji pola magnetycznego, \mathbf{B}_1 , \mathbf{B}_2 – składowe wektora \mathbf{B} – odpowiednio: pozioma i pionowa, \mathbf{j} – wektor gęstości prądu, \mathbf{j}_1 , \mathbf{j}_2 – składowe wektora \mathbf{j} – odpowiednio: pozioma i pionowa

W punktach leżących na spirali wektor indukcji jest skierowany ukośnie w dół. Można rozłożyć ten wektor na składową poziomą \mathbf{B}_1 , skierowaną radialnie i składową pionową \mathbf{B}_2 styczną do spirali. Podobnie, wektor gęstości prądu \mathbf{j} , płynącego w spirali jest styczny do kierunku zwoju i skierowany ukośnie. Wektor ten również rozłożymy na składową poziomą \mathbf{j}_1 i składową pionową \mathbf{j}_2 . Obie składowe \mathbf{j}_1 , \mathbf{j}_2 leżą w płaszczyźnie stycznej do powierzchni bocznej spirali. Wektory \mathbf{j}_1 i \mathbf{B}_1 są wzajemnie prostopadłe. Dlatego na element drutu spirali o długości Δl działa siła elektrodynamiczna $\Delta\mathbf{F}_1$, skierowana pionowo w górę. Używając przyjętych oznaczeń siłę $\Delta\mathbf{F}_1$ można wyrazić wzorem

$$\Delta\mathbf{F}_1 = S\Delta l(\mathbf{j}_1 \times \mathbf{B}_1), \quad (1)$$

w którym S oznacza pole przekroju poprzecznego drutu, użytego do nawinięcia spirali. Jeżeli wypadkowa sił $\Delta\mathbf{F}_1$, powstających w różnych punktach spirali, jest dostatecznie duża, to spowoduje ona podniesienie zwojów spirali. W wyniku tego górny koniec spirali przestaje dotykać górnego bieguna baterii i obwód elektryczny zostaje przerwany. Siła $\Delta\mathbf{F}_1$ będzie wtedy równa zero i spirala opadnie pod własnym ciężarem. Spowoduje to ponowne zamknięcie obwodu i wytworzenie siły $\Delta\mathbf{F}_1$. Następnie procesy te powtarzają się i powodują drgania spirali. Drgania te są możliwe tylko dla takiej orientacji biegunów magnesu

i baterii oraz kierunku nawinięcia spirali, dla których siła $\Delta\mathbf{F}_1$ jest zwrócona do góry.

Podobnie wektory \mathbf{j}_2 i \mathbf{B}_1 też są wzajemnie prostopadłe i dlatego wytwarzana jest siła elektrodynamiczna $\Delta\mathbf{F}_2$, skierowana poziomo i prostopadłe do promienia krzywizny spirali. Siła ta wyraża się wzorem

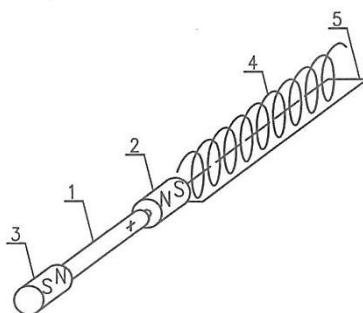
$$\Delta\mathbf{F}_2 = S\Delta l(\mathbf{j}_2 \times \mathbf{B}_2). \quad (2)$$

Moment siły związany z $\Delta\mathbf{F}_2$ jest przyczynkiem do momentu siły, powodującego obrót spirali. Należy jeszcze dodać, że składowa pozioma \mathbf{j}_1 wektora gęstości prądu jest prostopadła do składowej pionowej indukcji magnetycznej \mathbf{B}_2 , ale wytwarzana w wyniku tego siła elektrodynamiczna $\Delta\mathbf{F}_3$ jest skierowana wzdłuż promienia spirali. Siła $\Delta\mathbf{F}_3$ nie może więc wprawić spirali w ruch, a jedynie powoduje radialne naprężenia spirali. Znikomo mała wartość tych naprężeń uniemożliwia zaobserwowanie odkształcenia spirali. Ponadto, w zwojach spirali płynie prąd elektryczny w tym samym kierunku. Z tego powodu zwoje przyciągają się wzajemnie w kierunku pionowym. Siły tego przyciągania można pominąć, ponieważ są one znacznie mniejsze niż siła oddziaływania zwojów z polem magnetycznym, wytwarzanym przez magnes. Wskazują na to pomiary i obliczenia. Wynika z nich, że średnia wartość indukcji magnetycznej pola wytwarzanego przez magnes w obszarze spirali wynosi kilkadziesiąt mT. Dla porównania, średnia wartość indukcji pola wytwarzanego przez sąsiednie zwoje spirali przy typowym natężeniu prądu uzyskiwanym z baterii, ok. 2 A, jest rzędu μT . Można tu zauważyć, że podobne drgania relaksacyjne występują w interesującym przyrządzie znanym pod nazwą „spirala Rogeta”, w którym dolny koniec wiszącej pionowo spirali, złożonej z wielu zwojów drutu miedzianego jest zanurzony w metalowym naczynku z rtęcią [3, 4]. Po przyłączeniu górnego końca spirali i naczynka do źródła prądu o dużym natężeniu, spirala kurczy się wskutek wzajemnego przyciągania zwojów i przerywa obwód elektryczny. Następnie spirala opada pod własnym ciężarem, wykonując w ten sposób drgania relaksacyjne.

Liniowy silnik elektryczny

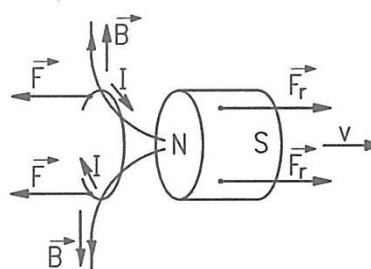
Budowa tego silnika została pokazana na rys. 3. Cała praca sprowadza się do nawinięcia spirali, liczącej kilkadziesiąt lub więcej zwojów miedzianego drutu na pręcie o średnicy ok. 1–2 mm większej, niż średnica magnesów. Zwoje muszą być nawijane równo jeden obok drugiego. Po nawinięciu spiralę zsuwamy z pręta. Dla zachowania prostoliniowego kierunku spirali, możemy ją przykleić kawałkami taśmy samoprzylepnej do linijki lub listewki. Do końców okrągłej baterii przykładamy po jednym magnesie neodymowym w kształcie walca. Magnesy muszą być zwrócone biegunami jednoimiennymi do obu końców baterii. Żeby uruchomić silnik, wsuwamy całkowicie baterię z magnesami do spi-

rali. Zauważymy wówczas, że bateria z magnesami zostanie albo wypchnięta ze spirali, albo wciągnięta i... wyjedzie z niej drugim końcem. Gdyby bateria została wypchnięta, należy ją odwrócić i wsunąć do spirali drugim końcem.



Rys. 3. Budowa liniowego silnika elektrycznego; 1 – bateria, 2, 3 – walcowe magnesy neodymowe, 4 – spirala z miedzianego drutu, 5 – linijka lub listewka, N, S – bieguny magnesów

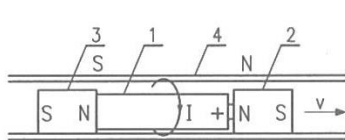
Spróbujmy w najprostszy sposób wyjaśnić działanie tego silnika, rys. 4. Po wsunięciu baterii do spirali, prąd elektryczny płynie od dodatniego bieguna baterii przez przyłożony do niego magnes, zwoje spirali zawarte między magnesami i dopływa do drugiego magnesu – przyłożonego do bieguna ujemnego. Musimy pamiętać, że linie pola magnetycznego w otoczeniu magnesów są zakrzywione. W wyniku tego istnieje składowa wektora indukcji pola magnetycznego prostopadła do zwojów spirali, w których płynie prąd elektryczny. Skutkiem tego na zwoje działa siła elektrodynamiczna, skierowana wzdłuż osi spirali. Zwrot tej siły można wyznaczyć za pomocą znanych reguł, np. reguły lewej dłoni. Siła elektrodynamiczna dąży do przesunięcia spirali, ale jest to niemożliwe, ponieważ spirala opiera się o stół. W tej sytuacji, zgodnie z trzecią zasadą dynamiki, spirala działa na baterię z magnesem siłą reakcji, zwróconą w przeciwną stronę i powoduje jej przesuwanie. Po przesunięciu się baterii magnesy „załączają” kolejne zwoje spirali, a inne – „uwalniają”. Opisana powyżej sytuacja ma miejsce aż do chwili, gdy bateria dojedzie do końca spirali i jeden magnes się z niej wysunie, uniemożliwiając dalszy przepływ prądu.



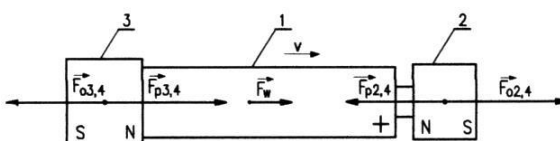
Rys. 4. Najprostszy sposób wyjaśnienia zasady działania liniowego silnika elektrycznego; N, S – bieguny magnesów, B – indukcja pola magnetycznego, I – natężenie prądu, F – siła elektrodynamiczna działająca na spiralę, F_r – siła reakcji działająca na wózek, v – prędkość

Możemy również dokonać wyjaśnienia rozpatrując bardziej szczegółowo siły działające w tym silniku. Załóżmy, że fragment spirali między magnesami

staje się solenoidem, przez który płynie prąd, rys. 5. Solenoid ten ma dwa bieguny magnetyczne, oddziałujące z biegunami magnesów neodymowych. Ponadto każdy z magnesów ma również dwa bieguny i magnesy te oddziałują ze sobą oraz z solenoidem, zarówno siłami przyciągania jak i odpychania. W sumie mamy sześć biegunów i tworzy się tu układ sił, przedstawiony na rys. 6. Są to siły zarówno przyciągania, jak i odpychania zwrócone w przeciwne strony. Decydujące znaczenie ma jednak oddziaływanie najbliższych biegunów solenoidu i magnesów, dla których siły mają największą wartość. W wyniku tego na baterie działa siła wypadkowa, powodująca jej przesuwanie wewnątrz spirali.



Rys. 5. Orientacja biegunów magnetycznych, wytwarzanych przez odcinek spirali w liniowym silniku elektrycznym; I – natężenie prądu; v – prędkość, cyfry 1–4 oznaczają takie same elementy, jak na rys. 3



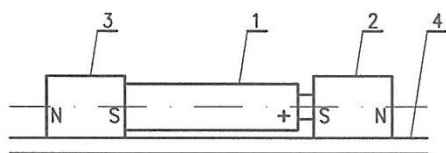
Rys. 6. Wyjaśnienie zasady działania liniowego silnika elektrycznego z pełną analizą układu sił; $F_{p3,4}$, $F_{p2,4}$ – siły przyciągania odpowiednio: magnesów 2 i 3 oraz odcinka spirali 4 (zob. rys. 5), $F_{o3,4}$, $F_{o2,4}$ – siły odpychania odpowiednio: magnesów 2 i 3 oraz odcinka spirali 4, F_w – siła wypadkowa, N, S – bieguny magnesów, v – prędkość

Dokładniejsza analiza pozwala zauważyć, że magnesy oddziałują również wzajemnie i powinny się odpychać, ponieważ zwrócone są do siebie biegunami jednoimiennymi. To prawda, ale siły oddziaływania magnesów ze sobą są siłami wewnętrznymi układu i nie mogą wprawić baterii w ruch. Siły te powodują jedynie ściskanie baterii. Ponieważ siły wewnętrzne nie mogą spowodować ruchu baterii, to na rys. 6 zostały one dla uproszczenia pominięte. Ponadto, bieguny magnesów indukują w stalowej osłonie baterii bieguny różnoimienne (na rys. 5 i 6 są to bieguny S) i można powiedzieć, że dzięki temu pary biegunów S-N znajdujące się blisko siebie ulegają „neutralizacji”. Gdyby bateria była zbyt krótka, albo nie miała stalowej osłony, to wówczas układ ten rozpadłby się z powodu odpychania magnesów.

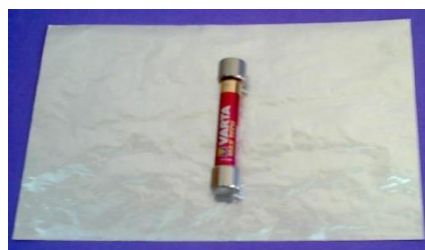
Rolkowy silnik elektryczny

Zajmiemy się teraz silnikiem, którego uruchomienie praktycznie nie wymaga żadnych narzędzi ani prac konstrukcyjnych. Na poziomej powierzchni położymy kawałek folii aluminiowej, a na nim baterię z magnesami z poprzednio opisanego silnika liniowego, rys. 7, fot. 3. Zauważymy wówczas toczenie się baterii po folii. Oczywiście ten widowiskowy efekt trzeba wyjaśnić. Gdy położymy baterię z magnesami na folii, to wówczas zamyka się obwód elektryczny i prąd popłynie od dodatniego bieguna baterii przez stykający się z nim magnes, folię

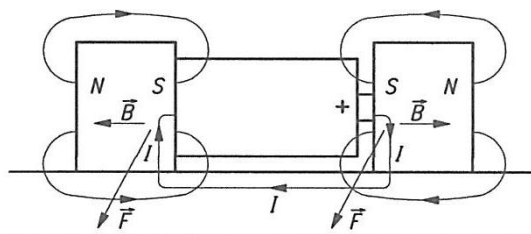
znajdującą się pod baterią aż do magnesu, dotykającego ujemnego bieguna baterii, rys. 8. Prąd ten wykazuje tzw. rozptył po powierzchni magnesów i folii. Gęstość prądu jest jednak największa wzdłuż linii o najmniejszym oporze elektrycznym. Dlatego z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że przepływ prądu 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 \mathbf{B} . W tej sytuacji, na magnesy działają siły elektrodynamiczne \mathbf{F} , skierowane stycznie do ich powierzchni bocznych. Siły te dają momenty względem punktów kontaktu magnesów z folią, będących tzw. chwilowymi środkami obrotu. Pod działaniem tych momentów zachodzi obrót magnesów wraz baterią i ich toczenie się po folii.



Rys. 7. Zestawienia elementów silnika rolkowego; 1 – bateria, 2, 3 – walcowe magnesy neodymowe, 4 – folia aluminiowa, N, S – bieguny magnesów



Fot. 3. Wygląd rolkowego silnika elektrycznego



Rys. 8. Wyjaśnienie zasady działania silnika rolkowego; \mathbf{B} – indukcja pola magnetycznego, I – natężenie prądu, \mathbf{F} – siła elektrodynamiczna, N, S – bieguny magnesów

Warto zauważyć analogię zasady działania silnika rolkowego do sytuacji, zachodzącej w opisywanym również w *Fotonie* 133 i często pokazywanym, tzw. najprostszym silniku elektrycznym [5]. Przypomnijmy, że w tym silniku magnes walcowy jest podwieszony pod baterią dzięki siłom przyciągania na wkręcie lub gwoździu. Trzymaną w ręku baterię zwiera się kawałkiem drutu, przyłożonego do jej górnego bieguna i bocznej powierzchni magnesu. Magnes w tej sytuacji zostaje wprawiony w ruch obrotowy przez siłę elektrodynamicz-

ną, wytwarzaną skutkiem radialnego przepływu prądu po płaskiej powierzchni magnesu, znajdującej się w jego polu magnetycznym. Co ciekawe, zasada działania tego silnika polega na odwróceniu zasady działania tzw. dysku Faradaya, stanowiącego najprostszego generatora unipolarnego, który wciąż jest tematem publikacji w prestiżowych czasopiśmie, wydawanych za granicą [6].

Podsumowanie

Opisane silniki elektryczne dają jeszcze wiele innych okazji do samodzielnych analiz i doświadczeń, które można zaproponować uczniom. Jako najprostsze przykłady takich dociekań można polecić zbadanie zależności kierunku przesuwu baterii w silniku liniowym od wszystkich możliwych orientacji biegunów magnesów, baterii i kierunku nawinięcia spirali (w sumie 8 kombinacji)¹. Analogiczne rozważania daje się przenieść na kierunek obrotu spirali lub toczenia się baterii w silniku oscylacyjnym i rolkowym. Bardziej ambitnym uczniom warto zaproponować doświadczenia o charakterze ilościowym, polegające, np. na wyznaczeniu sprawności silnika liniowego lub rolkowego, czy zbadaniu wpływu wybranych parametrów, takich jak liczba zwojów spirali, jej średnica i skok, na częstotliwość oscylacji oraz szybkość obrotów. Doświadczenia takie, wykonalne również w warunkach domowych przy użyciu łatwo dostępnych środków – miernik uniwersalny, stoper, linijka, waga kuchenna itp., dają często zaskakujące wyniki. Dlaczego np. w silniku rolkowym, bateria toczy się znacznie wolniej lub wcale, gdy folię aluminiową zastąpić blachą aluminiową, albo miedzianą? Przecież blachy są grubsze, niż folia i mają mniejszy opór, a więc siła elektrodynamiczna, wprawiająca w ruch baterię, też powinna wtedy być większa? Kończąc warto zauważyć, że podobnego typu proste układy, o niebanalnej zasadzie działania, są często tematami zadań na Olimpiadach Fizycznych i prac badawczych w Turniejach Młodych Fizyków oraz innych konkursach o uznanej randze.

Literatura

- [1] J. Domański, *Doświadczalny hit – magnesy neodymowe*, „Fizyka w Szkole”, 5, 2005, 270–273.
- [2] K. Gołębiowski, W. Peters, G. Karwasz, *Mikser z magnesem (na deser)*, *Foton* 104, Wiosna 2009, 54–56.
- [3] T. Dryński, *Doświadczenia pokazowe z fizyki*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1966, 523.
- [4] G.D. Freier, F.J. Anderson, *A demonstration handbook for physics*, American Association of Physics Teachers, College Park Madison 1996, 85.
- [5] G. Brzezinka, *Prosty silnik i... nie tylko!*, *Foton* 98, Jesień 2007, 63–64.
- [6] F.J. Müller, *Unipolar Induction Revisited: New Experiments and the „Edge Effect” Theory*, „*IEEE Transactions on Magnetics*”, Vol. 50, no. 1, January 2014, doi: 10.1109/TMAG.2013.2282133.

¹ Zob. artykuł w *Fotonie* 133, s. 34.