

7.3.e. Spadający magnes w miedzianej rurze (bez nacięć i z nacięciami)

Cel: badanie ruchu magnesu w miedzianej rurze

Środki dydaktyczne z zestawu doświadczalnego:

- magnes neodymowy
- miedziana rura bez nacięć
- miedziana rura z nacięciami



Fot. 7.8. Sposób wykonania doświadczenia.

Wykonanie:

Do miedzianej rury bez otworów wrzucić magnes. Słuchać, jak się obija o ściany rurki? Popatrz, jak magnes porusza się w jej wnętrzu. Jak określiłbyś, „co robi magnes”?

Podaj rurkę ze spadającym magnesem w środku koledze. Magnes nadal jest w środku rurki?

Ten sam magnes wrzucić do miedzianej rury z nacięciami. Jak się tym razem porusza? Opisz słownie ten sposób spadania.

Wyjaśnienie:

W przypadku rury miedzianej bez nacięć magnes poruszał się w charakterystyczny sposób: nie tylko spada powoli, ale spada *nie dotykając* ścianek rurki. Tak jakby byłby od tych ścianek odpychany! Można powiedzieć, że magnes „lewituje”.

Poruszający się wewnątrz rury bez nacięć magnes wywołał powstanie przepływu prądu. Ponownie mamy do czynienia ze zmiennym polem magnetycznym, które wywołuje przepływ prądu. W jakim kierunku płyną te prądy? Zgodnie z regułą Lenza w takim, aby pole magnetyczne *indukowane* (czyli wytworzone przez indukowane *prądy*) przeciwstawiało się ruchowi magnesu. Ponieważ magnes *spada*, indukowane prądy *podtrzymują* magnes – wydaje się, że magnes *lewituje* (jak latający spodek, o ile takie istnieją).

Spadający magnes ma bieguny skierowane pionowo – indukowany magnes też powinien być ustawiony w pionie. Z doświadczeń z cewkami wiemy już, że wytwarzają pole wzdłuż ich osi. Czyli w rurce indukowane prądy muszą tworzyć okręgi, po obwodzie rurki.

W rurce z nacięciami te okręgi zostały przecięte. Prądy są nadal indukowane, ale nie mają one *właściwego* kierunku. Magnes więc nie może lewitować i spada obijając się o wnętrze rurki (obejrzyj to dokładnie i wyciągnij wnioski samodzielnie).

Uwagi dydaktyczne:

Wbrew „widowiskowemu” charakterowi doświadczenia w rurce z nacięciami, jest to doświadczenie bardzo trudne i w zasadzie „zastrzeżone” dla dydaktyki na poziomie uniwersyteckim.

Idea tego doświadczenia zrodziła się z dydaktyki na Uniwersytecie w Trydencie, gdzie bardzo dobrze skąd inąd przygotowani studenci mieli poważne kłopoty z połączeniem „klasycznego” sformułowania prawa indukcji z prawami Maxwella

Podręcznikowe sformułowanie prawa indukcji operuje pojęciem „siły elektromotorycznej” $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

i strumienia pola magnetycznego Φ_B . O ile strumień pola magnetycznego występuje również w równaniach Maxwella (w równaniach Maxwella dla *próżni*, w szczególności), to siły elektro-motorycznej w równaniach tych nie ma.

Co to jest siła elektromotoryczna? W zadaniach z bateriami i opornikami jest to „siła”, która powoduje przepływ prądu. Dokładniej, jest to napięcie mierzone na baterii, kiedy prąd *nie przepływa*, lub innymi słowy na baterii bez oporu *wewnętrznego*, albo napięcie mierzone miernikiem o *nieskończenie dużej* oporności wewnętrznej.

W każdym bądź razie, dla zdefiniowania siły elektromotorycznej musi istnieć przewód elektryczny, tworzący obwód a w tym obwodzie miernik napięcia (woltomierz). Taka próżnia oczywiście próżnią już nie jest! Czy w próżni bez przewodnika (i elektronów w nim zawartych) można poprawnie zapisać prawo indukcji?

Oczywiście, ale musimy najpierw przypomnieć czym jest napięcie. Zgodnie z prawami elektrostatyki, napięcie jest całką z pola elektrycznego. Napięcie to jakby różnica wysokości między piętrami w szkole. Pole elektryczne (albo grawitacyjne) to przyczyna staczania się po schodach lub drodze o określonym nachyleniu. Aby stwierdzić, ile wynosi różnica między poziomami w szkole, musimy policzyć ilość schodów (i znać ich nachylenie).

Matematycznie różnica potencjałów U_{AB} między punktami A i B jest równa całce z pola elektrycznego po trajektorii od A do B (iloczyn skalarny pojawia się, gdyż zarówno pole $\mathbf{E}$ jak i element $d\mathbf{l}$ trajektorii są wektorami a znak minus gdyż pole elektryczne ma zwrot w kierunku malejącego potencjału).

$$V_{AB} = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

Jako przyczynę przepływu prądu podajemy zazwyczaj różnicę potencjału między końcami przewodnika. Tak! tak jest, ale równie dobrze (i nawet właściwiej) można stwierdzić, że powodem przepływu prądu jest *pole* elektryczne wewnątrz przewodnika. Oczywiście! Bo w jaki sposób elektrony w środku przewodnika mają „wiedzieć”, że na jego końcach istnieje różnica potencjałów? (Rozumowanie to odnajdujemy w podręcznikach uniwersyteckich w rozdziałach o „mikroskopowym ujęciu prawa Ohma”.)

Jesteśmy już gotowi do zapisania prawa indukcji w postaci prawa Maxwella

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Całka po trajektorii zamkniętej pojawia się, gdyż szukamy nie jakiegokolwiek różnicy potencjałów ale *siły elektromagnetycznej* czyli różnicy potencjałów dla obwodu *zamkniętego*.

Nacięcia w rurce to właśnie zamiana całki z całki po prostej trajektorii w postaci okręgu na całkę po jakiejś skomplikowanej wstążce między szczelinami. Prądy indukowane powstają,

ale nie mają już „właściwego”, obwodowego kierunku – magnes obija się o ścianki i przykleja do rurki właśnie wzdłuż szczelin.

Uproszczone wyjaśnienie doświadczenia w rurce z nacięciami jest oczywiście możliwe, ale nauczyciel powinien mieć świadomość, że nacięcia w rurce pojawiły się nie przypadkowo, ale jako odpowiedź na trudności dydaktyczne na poziomie uniwersyteckim. A za szczególnie niewłaściwe dydaktycznie należy uznać porównywanie czasów spadków. Bo i tak czasów tych *policzyć* nie umiemy!