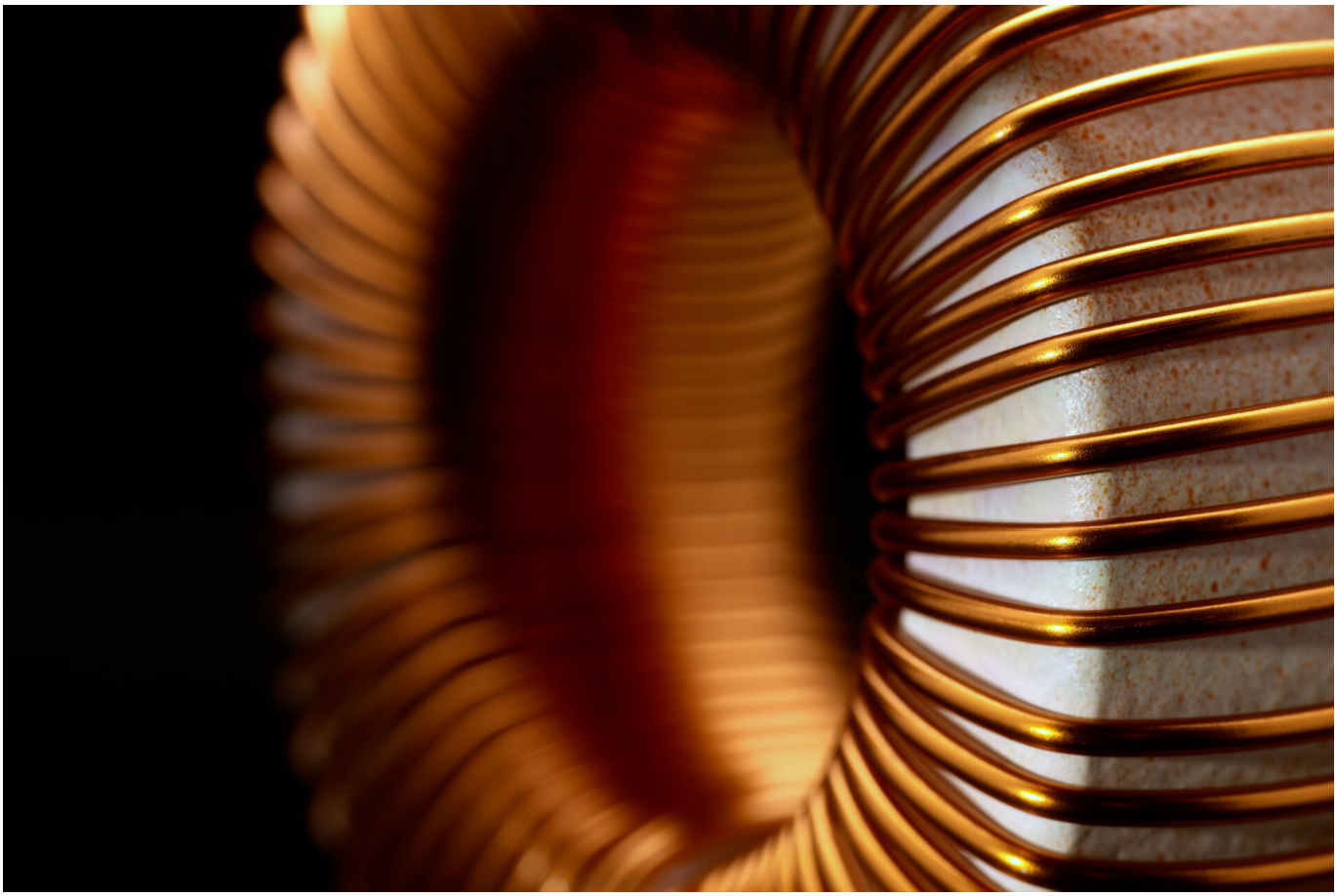


Czym jest zjawisko samoindukcji?

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Symulacja interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela

Źródło: dostępny w internecie: https://www.shutterstock.com/image-photo/detail-electronic-conductor-dark-back-171568955 [dostęp 15.05.2022].

Czy to nie ciekawe?

Być może zauważyłeś, że podczas wyciągania z gniazdka wtyczki włączonego żelazka albo odkurzacza przeskakuje iskra elektryczna między wtyczką a gniazdkiem elektrycznym. Aby w powietrzu mogło nastąpić wyładowanie iskrowe, między punktami, pomiędzy którymi przeskakuje iskra, musi zaistnieć wysokie napięcie (rzędu tysięcy woltów). Wystąpienie tak wysokiego napięcia spowodowane jest, w omawianym przypadku, zjawiskiem samoindukcji.

Powstawanie iskry elektrycznej możesz też zaobserwować, gdy z jakichś powodów, np. oblodzenia przewodów trakcji elektrycznej, następuje przerwa między pantografem a tymi przewodami.

Rys. a. Zdjęcie przedstawia iskrę wyładowania elektrycznego między pantografem a trakcją elektryczną.
Źródło: Sparking pantograph by Thomas Nugent, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sparking_pantograph_-_geograph.org.uk_-_2216440.jpg [dostęp 15.05.2022], licencja: CC BY-SA 2.0.

Ten e-materiał pomoże ci zapoznać się ze zjawiskiem samoindukcji i wyjaśnić opisane wyżej przypadki iskrzenia.

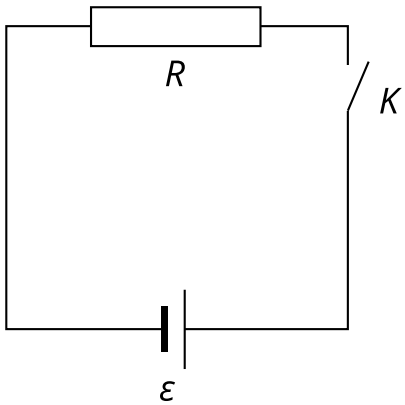
Twoje cele

- dowiesz się, na czym polega zjawisko samoindukcji,
- obliczysz wartość siły elektromotorycznej samoindukcji na podstawie szybkości zmiany natężenia prądu w obwodzie,
- dowiesz się, co to jest indukcyjność obwodu elektrycznego,
- wykażesz wpływ siły elektromotorycznej samoindukcji na zmiany natężenia prądu w obwodzie,
- zrozumiesz, dlaczego powstaje iskra podczas rozłączania obwodu o dużej indukcyjności.

Przeczytaj

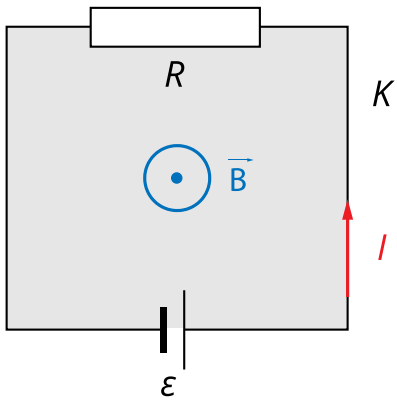
Warto przeczytać

Ze zjawiskiem samoindukcji mamy do czynienia wtedy, gdy w obwodzie zmienia się natężenie prądu. Wyobraź sobie najprostszy obwód elektryczny zawierający ogniwo i opornik. Zamykamy obwód i zaczyna płynąć prąd. Ale prąd jest źródłem pola magnetycznego, zmieniającego się tak, jak natężenie prądu. Ono rośnie od zera, a to oznacza, że indukcja magnetyczna pola magnetycznego pochodzącego od tego prądu też rośnie od zera do jakiejś wartości. Rys. 1a i 1b przedstawiają schematycznie opisaną sytuację.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Rys. 1a



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Rys. 1b

Wraz z pojawieniem się pola magnetycznego, pojawił się strumień indukcji magnetycznej, przenikający powierzchnię rozpiętą na obwodzie; na rysunku zaznaczoną szarym kolorem. Przedtem strumień wynosił zero. Mamy więc do czynienia ze zmianą strumienia pola magnetycznego, a to skutkuje pojawieniem się siły elektromotorycznej (SEM) indukcji. Ta specjalna SEM indukcji, wytworzona w obwodzie elektrycznym na skutek zmiany natężenia prądu w tymże obwodzie zwana jest SEM samoindukcji i symbolicznie zapisywana jako $\mathscr{E}_{sam}$.

Zobaczmy, od czego zależy jej wartość. Wyjdźmy od prawa Faradaya:

$$\mathscr{E}_{sam} = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}, \quad \text{przy} \quad \Delta t \to 0$$

(*Co można zapisać krócej jako* $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$. *Zapis:* $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ *oznacza pochodną funkcji* Φ *po czasie, co rozumiemy właśnie jako* $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, *gdy* $\Delta t \to 0$. *Sensem fizycznym pochodnej strumienia* Φ *po czasie jest szybkość zmiany strumienia.*)

W przypadku samoindukcji zmiana strumienia spowodowana jest zmianą wartości indukcji B, bo zmienia się ona wprost proporcjonalnie do natężenia prądu, co można zapisać:

$$B = A \cdot I,$$

gdzie A jest stałą opisującą geometrię konkretnego obwodu. Strumień indukcji zapiszemy jako $\Phi_B = B \cdot S$, gdyż wektor indukcji $\overrightarrow{B}$ jest tak samo skierowany jak wektor powierzchni $\overrightarrow{S}$. Po podstawieniu wartości B otrzymujemy:

$$\Phi_B = S \cdot A \cdot I$$

Zauważ, że wielkość będąca iloczynem S·A charakteryzuje obwód – jego wielkość, kształt, liczbę zawieranych w nim zwojów. Ten iloczyn nazywa się indukcyjnością obwodu, oznacza symbolem L i nadaje mu jednostkę. Tak więc strumień możemy zapisać jako:

$$\Phi_B = L \cdot I$$

Zatem szybkość zmiany strumienia z minusem, która jest wartością SEM samoindukcji, jest wyrażona następująco:

$$\mathscr{E}_{sam} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

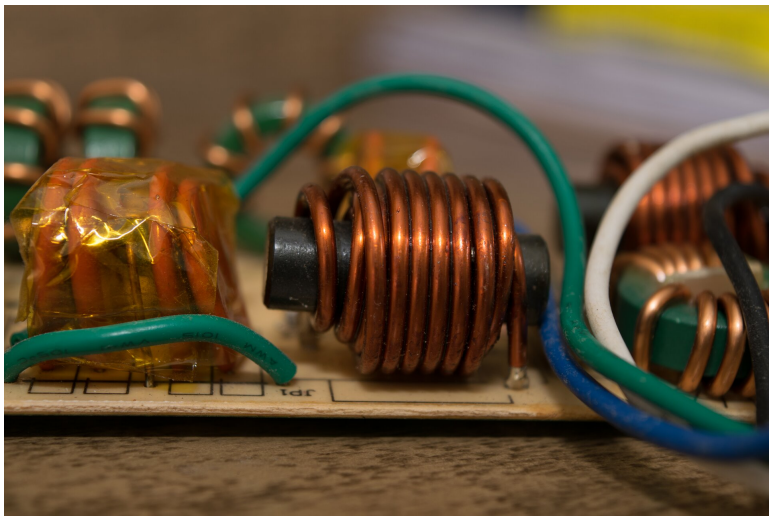
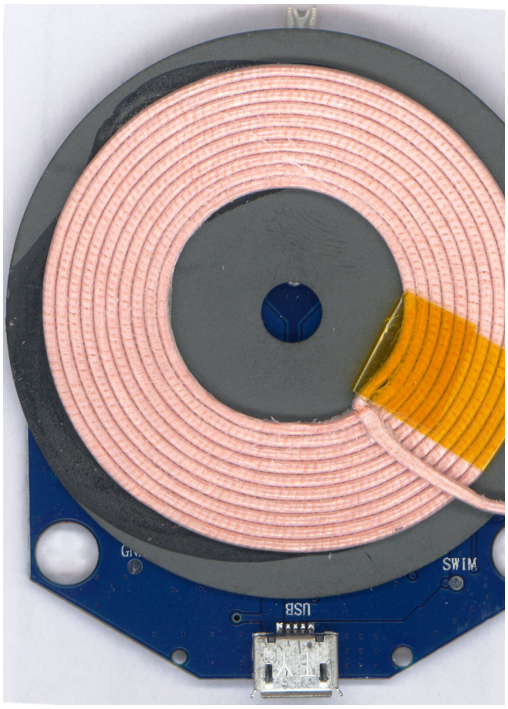
Jednostką indukcyjności obwodu jest henr (H). Indukcyjność obwodu wynosi 1 henr, jeśli w obwodzie powstaje SEM samoindukcji równa 1 woltowi, przy szybkości zmiany natężenia prądu 1 amper na sekundę. Indukcyjność silnie zależy od liczby zwojów występujących w obwodzie. Istnieje specjalny element w elektrotechnice zwany cewką indukcyjną, który charakteryzuje się znacznie większą indukcyjnością niż rozważany przez nas obwód.

Źródło: Vahid alpha at English Wikipedia, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Resistor_shaped_Inductors.png [dostęp 15.05.2022 r.], licencja: CC BY 3.0.

Cewki indukcyjne osiowe (dławiki)

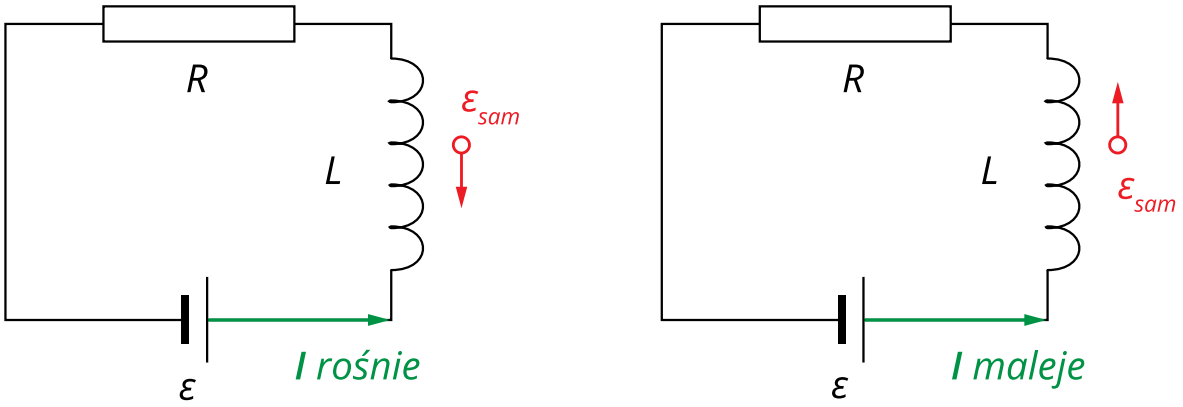
Źródło: Peripitus, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toroidal_ [dostęp 15.05.2022 r.], licencja: CC BY-SA 4.0.

Cewka toroidalna (dławik przeciwzakłóceniowy)

 Źródło: Marcnovac, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inductor_filter_-_Line_filter.jpg [dostęp 15.05.2022 r.], licencja: CC BY-SA 4.0. Cewka indukcyjna z rdzeniem	 Źródło: Nostrils.ua, dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:QI_Char [dostęp 15.05.2022 r.], licencja: CC BY-SA 4.0. Cewki płaskie stosowane w ładowa indukcyjnych

Tabelka powyżej przedstawia zdjęcia różnych typów cewek indukcyjnych stosowanych w technice.

Wróćmy do sytuacji opisanej na początku: włączamy obwód, który charakteryzuje się dużą indukcyjnością (zawiera cewkę). Na Rys. 2. widzimy obwód już zamknięty, z symbolicznie zaznaczoną cewką.



Rys. 2. a, b

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Opiszemy tu jakościowo, co dzieje się w obwodzie, jak działa SEM samoindukcji. Prąd rośnie, wobec tego – zgodnie z regułą Lenza – siła elektromotoryczna samoindukcji

skierowana jest przeciwnie do kierunku prądu, tak aby zapobiegać wzrostowi tego prądu (zobacz Rys. 2a.). Natężenie prądu będzie rosło, ale wolniej niż w obwodzie pozbawionym cewki indukcyjnej.

Z kolei, gdyby z jakiejś przyczyny prąd w obwodzie malał, to znowu SEM samoindukcji skierowana byłaby przeciwnie niż poprzednio (zobacz Rys. 2b.), czyli zgodnie z kierunkiem prądu, co powodowałoby powstrzymywanie malenia natężenia prądu.

Można stąd wywnioskować, że cewka indukcyjna jest elementem „bezwładnościowym" w obwodzie – opóźnia jakąkolwiek zmianę natężenia prądu.

Pora teraz na wyjaśnienie iskrzenia podczas gwałtownego rozłączania obwodu elektrycznego, np. z silnikiem. Ponieważ silnik zawiera uzwojenie, to indukcyjność obwodu jest duża. Wtedy przy małym czasie Δt zmiany natężenia prądu (gwałtowne wyłączenie) SEM indukcji jest bardzo duża. Zgodnie z regułą Lenza, przeciwdziała ona zmianie strumienia (gwałtownemu maleniu), wymuszając dalsze płynięcie prądu, który w przerwanym obwodzie może już tylko płynąć w powietrzu, w postaci iskry elektrycznej.

Słowniczek

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej

(ang. *electromagnetic induction*) - wytwarzanie prądu indukcyjnego (SEM indukcji) w obwodzie zamkniętym podczas zmiany strumienia pola magnetycznego przechodzącego przez ten obwód.

SEM indukcji

(ang. *motional electromotive force*) - przyczyna płynięcia prądu indukcyjnego; odpowiednik SEM ogniwa w obwodzie prądu stałego. Jest zdefiniowana jako iloraz pracy wykonanej przy wzbudzaniu prądu indukcyjnego i ładunku, który przepłynął przez obwód elektryczny.

Strumień indukcji magnetycznej

(ang. *magnetic flux*) - strumieniem Φ_B indukcji magnetycznej przez powierzchnię S nazywamy iloczyn skalarny wektorów $\vec{B}$ i $\vec{S}$. $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \alpha$, gdzie $\alpha = \sphericalangle\left(\vec{B}, \vec{S}\right)$. Jednostka strumienia to 1 Wb (weber), 1 Wb = 1 T·m^2.

Iskrowe wyładowanie elektryczne

(ang. *spark electric discharge*) - rodzaj wyładowania elektrycznego w gazach, polegający na przebiciu obszaru międzyelektrodowego przy wysokim napięciu; w trakcie tego rodzaju wyładowania następuje silne zjonizowanie gazu i nagrzanie jego cząsteczek do bardzo wysokiej temp. (ok. 10 000 K), co powoduje jaskrawe świecenie gazu i efekty akustyczne związane z silną falą uderzeniową.

Reguła Lenza

(ang. *Lenz's law*) – reguła ułatwiająca szybkie wyznaczenie kierunku prądu indukcyjnego. Formułuje się ją najczęściej w następujący sposób: **Kierunek prądu indukcyjnego jest taki, że przeciwdziała przyczynie, która go wywołała.**

Przeciwdziałanie przyczynie polega tu na tym, że gdy strumień rośnie, to pole magnetyczne wytworzone przez prąd indukcyjny jest tak skierowane, żeby zmniejszyć ten strumień. I odwrotnie: gdy strumień maleje, to wyindukowane pole magnetyczne jest tak skierowane, żeby strumień wzmocnić.

Symulacja interaktywna

Czym jest zjawisko samoindukcji?

Symulacja przedstawia schemat elektryczny układu, w którym po przełączeniu klucza będzie następowało „rozładowanie” prądowe cewki. Początkowo ogniwo jest dołączone i przez cewkę płynie prąd. Po starcie symulacji momentalnie odłączamy ogniwo i zwieramy końce cewki przez opornik, pozwalając na przepływ prądu.

Zasób interaktywny dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/Dad7Ft58t

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Polecenie 1

Sprawdź na symulacji, jak indukcyjność cewki i opór opornika wpływają na zmianę natężenie prądu w obwodzie.

Polecenie 2

Polecenie to przeznaczone jest dla chętnych zainteresowanych tym tematem i nie bojących się przy tym pracy z komputerem.

Symulację zawartą w tym materiale możesz wykonać sam, korzystając z arkusza kalkulacyjnego lub dowolnego języka programowania.

Równanie, które opisuje każdy obwód elektryczny, to II prawo Kirchhoffa. W tym przypadku będzie miało ono postać:

$$\varepsilon_{\mathrm{sam}} = IR.$$

Dalej, po podstawieniu

$$\varepsilon_{\mathrm{sam}} = -L\frac{\mathrm{dI}}{\mathrm{dt}},$$

otrzymamy:

$$-L\frac{\mathrm{dI}}{\mathrm{dt}} = IR.$$

To równanie opisuje problem, w którym na wynik – funkcję zależności natężenia prądu od czasu $I(t)$ - wpływa szybkość zmiany natężenia prądu $\frac{\mathrm{dI}}{\mathrm{dt}}$. Tego typu zależności często występują w fizyce a rozwiązanie powyższego równania nie jest trudne, ale wykracza zdecydowanie poza zakres matematyki nauczanej w liceum.

Metoda numeryczna pozwala jednak znaleźć wykres funkcji $I(t)$ bez stosowania zaawansowanej matematyki. Jest prosta i całkiem naturalna. Polega na wykonywaniu obliczeń komputerowych „krok po kroku”. Posuwamy się małymi przedziałami czasowymi Δt. Uwaga: komputer nie rozumie zmian nieskończenie małych, należy zawsze stosować konkretne wartości (ale bardzo małe). W naszym modelu przyjmijmy Δt = 0,0005 s.

Znamy początkowe natężenie prądu I_0. Następną wartość I, po czasie Δt, obliczamy zawsze w ten sam sposób: dodając ΔI do poprzedniej wartości I. Zmianę natężenia

prądu Δ*I* wyznaczamy na podstawie przekształconego wzoru podstawowego, gdzie zamiast pochodnej $\frac{\mathrm{dI}}{\mathrm{dt}}$ używamy ilorazu $\frac{\Delta I}{\Delta t}$:

$$\Delta I = -\frac{R}{L} I \Delta t.$$

Obliczenia możecie przeprowadzić w arkuszu kalkulacyjnym według schematu:

t	***I***	**Δ*I***
0	= I_0	
= + Δ*t*	= + Δ*I*	$= -R/L*I*\Delta t$

Kopiowanie w dół wypełnionego wzorami drugiego wiersza powoduje, że cała procedura będzie wielokrotnie powtarzana wiersz za wierszem (w następnym przedziale Δ*t*).

Spróbuj sam powtórzyć obliczenia pokazane na symulacji korzystając z powyższej metody. Nie jest to trudne!

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

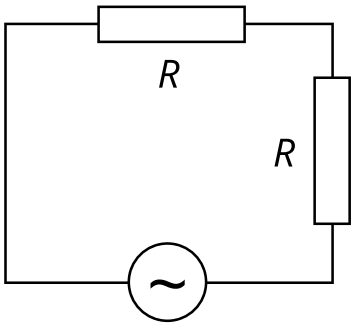
W okienko poniżej wpisz zakończenie zdania.

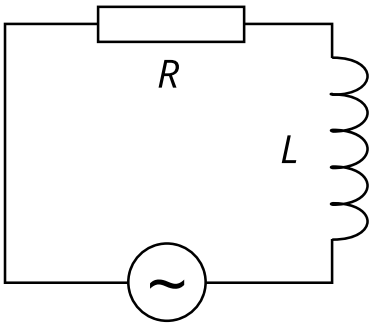
Odp.:

Zjawisko samoindukcji zachodzi w obwodzie elektrycznym zawsze wtedy, gdy w tym obwodzie zmienia się _____.

Ćwiczenie 2

Na rysunku przedstawiono dwa obwody zasilane napięciem przemiennym. Wskaż obwód, w którym zjawisko samoindukcji ma większe znaczenie.

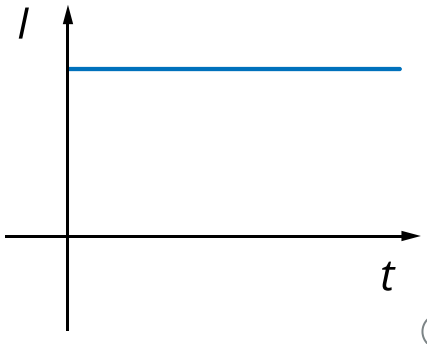


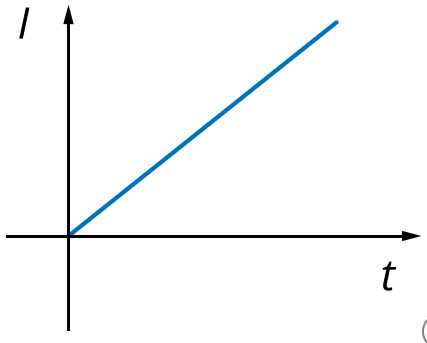


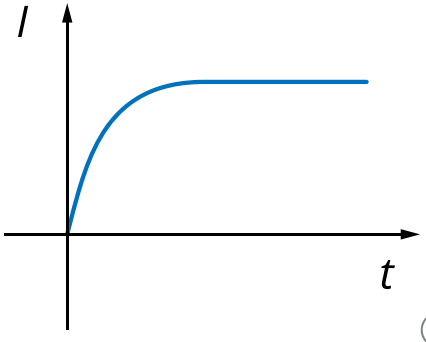
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Ćwiczenie 3

Z wykresów przedstawionych poniżej wybierz ten, który dobrze obrazuje zmiany natężenia prądu podczas podłączania obwodu z dużą indukcyjnością do ogniwa.







Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

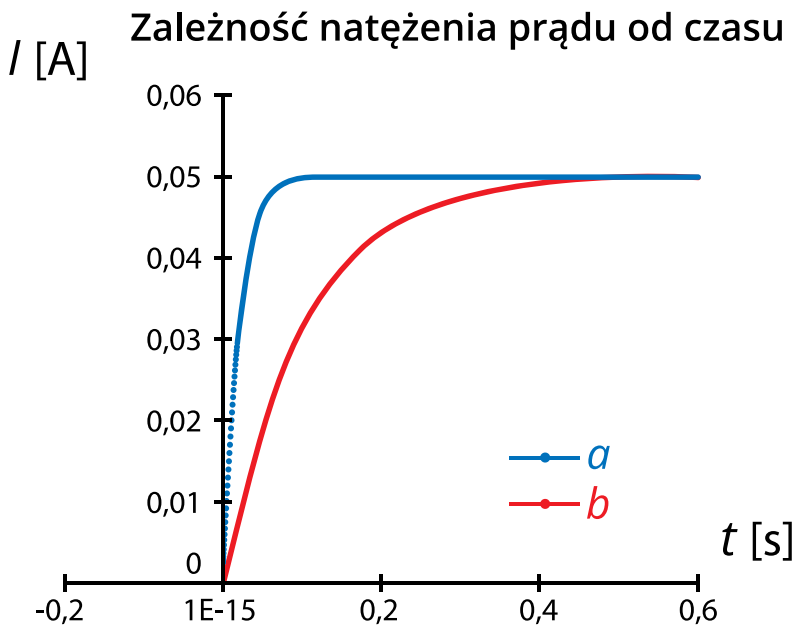
Ćwiczenie 4

W przybliżeniu, by uzyskać iskrę długości 1 mm, potrzeba napięcia 1000 V. Jak długą iskrę wygenerujemy, jeśli przerwiemy w ciągu t = 5 μs obwód z cewką o indukcyjności L = 10 mH, przez który płynie prąd o natężeniu I = 1 A?

l = _____ mm

Ćwiczenie 5

Budujemy dwa obwody elektryczne z różnymi cewkami indukcyjnymi i takimi samymi opornikami. Podłączamy takie samo ogniwo do każdego obwodu. Analizując pokazane niżej wykresy, zaznacz ten, który odpowiada obwodowi o większej indukcyjności.



- wykres b
- wykres a

Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

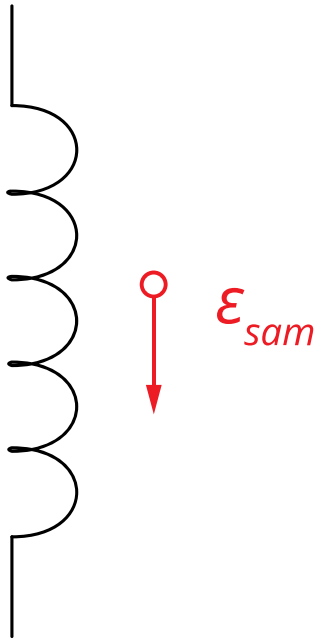
Ćwiczenie 6

Prąd płynący w uzwojeniu zwojnicy zmalał o 5 A w czasie Δt = 0,25 s. Wzbudzona średnia SEM samoindukcji wyniosła 0,15 V. Oblicz indukcyjność zwojnicy. Odpowiedź wpisz w okienko.

Odp.: L = _____ mH.

Ćwiczenie 7

Na rysunku przedstawiony jest fragment obwodu z cewką indukcyjną z zaznaczonym kierunkiem siły elektromotorycznej samoindukcji.
Spośród podanej niżej listy możliwości wybierz poprawne zakończenie zdania.
Prąd płynący przez cewkę:



- [ ] rośnie i płynie w dół
- [ ] rośnie i płynie w górę
- [ ] jest stały i płynie w dół
- [ ] jest stały i płynie w górę
- [ ] maleje i płynie w górę
- [ ] maleje i płynie w dół

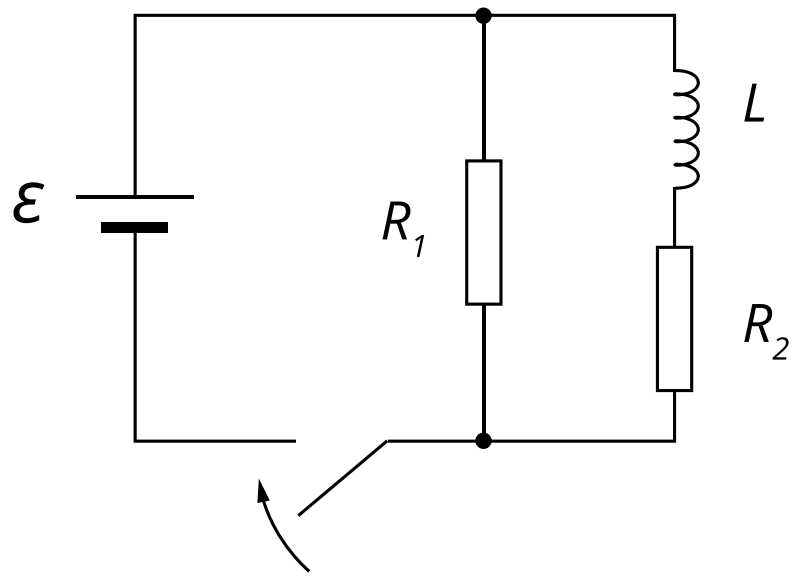
Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Ćwiczenie 8

Rysunek przedstawia schemat obwodu zasilanego przez ogniwo o pomijalnym oporze wewnętrznym. Oblicz natężenie prądu płynącego w obwodzie

a) tuż po zamknięciu klucza,
b) po upływie długiego czasu po zamknięciu obwodu.

Dane są parametry obwodu: $\mathscr{E}$ = 6 V, $R_1 = R_2 = 100\ \Omega$, L = 4 H.



Źródło: Politechnika Warszawska Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. Licencja: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl.

Wyniki obliczeń wpisz w okienka.

Odp.:

a) I = _____ A;

b) I = _____ A

Dla nauczyciela

Scenariusz lekcji:

Imię i nazwisko autora:	Nina Tomaszewska
Przedmiot:	fizyka
Temat zajęć:	**Czym jest zjawisko samoindukcji?**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. IX. Magnetyzm. Uczeń: 11) opisuje jakościowo zjawisko samoindukcji.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wyjaśni, na czym polega zjawisko samoindukcji, 2. zapisze związek wartości siły elektromotorycznej samoindukcji z szybkością zmiany natężenia prądu w obwodzie, 3. zdefiniuje indukcyjność obwodu elektrycznego, 4. obliczy wpływ zmiany natężenia prądu w obwodzie na siłę elektromotoryczną samoindukcji, 5. wyjaśni, dlaczego powstaje iskra podczas rozłączania obwodu o dużej indukcyjności.
Strategie nauczania	blended-learning, nauczanie przez odkrywanie
Metody nauczania	wykład informacyjny wspomagany pokazem multimedialnym
Formy zajęć:	praca w zespole klasowym
Środki dydaktyczne:	niniejszy e-materiał + komputer z rzutnikiem lub tablety do dyspozycji każdego ucznia
Materiały pomocnicze:	-
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel zaciekawia uczniów problemem wyładowania iskrowego podczas gwałtownego otwierania obwodu, w którym jest element o dużej indukcyjności.	
Faza realizacyjna:	
Najpierw nauczyciel wyjaśnia, na czym polega zjawisko samoindukcji i wyprowadza zależność opisującą SEM samoindukcji. Tłumaczy sens fizyczny tego zjawiska, analizując, co dzieje się w obwodzie z indukcyjnością (cewką), gdy prąd rośnie, albo gdy prąd maleje. Następnie uczniowie samodzielnie zapoznają się z symulacją. Badają przebieg zmniejszania się natężenia prądu w cewce po odłączeniu ogniwa. Powinni oni wykryć, że czas, po którym nie będzie przez cewkę płynął prąd, zależy od stosunku $\frac{R}{L}$.	
Faza podsumowująca:	
W fazie podsumowującej nauczyciel wraz z uczniami powinien rozwiązać zadania 3, 4, 7 i 8 z zestawu ćwiczeń.	
Praca domowa:	
Zadania z zestawu ćwiczeń: 1, 5, 6. Jako podsumowanie pracy z symulacją warto też w domu rozwiązać zadanie 2.	

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium	Zastosowana tutaj symulacja interaktywna odnosi się do konkretnego problemu, ale jest przykładem modelowania numerycznego i można zajmować się nią w dydaktyce fizyki całkiem niezależnie.