



Proszę o uwagę

FIZYKA 2

konsultacje:
poniedziałek

15⁰⁰-16⁰⁰

prof. dr hab. inż.
Leszek R. Jaroszewicz
czł. koresp. PAN

pok. 071/100
tel. 261839393
e-mail: jarosz@wat.edu.pl



Rozliczenie godzinowe

Semestr	Forma zajęć			
	Razem	Wykłady	Ćwiczenia	Laboratoria
II	80	40	30	10
III	60	30	20	10
Suma	140	70	50	20

Treść programu (Fizyki 2)

- Obwody prądu zmiennego
- Ruch falowy: fale mechaniczne, akustyczne i elektromagnetyczne
- Optyka falowa i geometryczna
- Dualizm korpuskularno-falowy
- Wprowadzenie do mechaniki kwantowej
- Cząstka w studni potencjału, efekt tunelowy
- Kwantowa teoria atomu
- Termodynamika
- Pasmowa teoria przewodnictwa
- Kwantowe generatory promieniowania
- Fizyka jądrowa

EFEKTY KSZTAŁCENIA

Po ukończeniu zajęć student:

- ma wiedzę w zakresie fizyki niezbędną do zrozumienia podstawowych zjawisk fizycznych
- zna podstawowe prawa i zasady fizyki z zakresu ruchu falowego, optyki, mechaniki kwantowej i fizyki ciała stałego
- **rozumie zjawiska fizyczne**
- ma umiejętność wykorzystania praw przyrody w technice i życiu codziennym
- **potrafi stosować zapis matematyczny do ilościowego opisu zjawisk fizycznych**
- ma świadomość ważności zachowywania się w sposób profesjonalny, konieczności przestrzegania zasad etyki zawodowej

Literatura

1. OpenStax: Fizyka dla szkół wyższych (wersja PDF i internetowa)
 - tom 1, <https://openstax.org/details/books/fizyka-dla-szkol-wyzszych-tom-1>
 - tom 2, <https://openstax.org/details/books/fizyka-dla-szkol-wyzszych-tom-2>
 - tom 3, <https://openstax.org/details/books/fizyka-dla-szkol-wyzszych-tom-3>
2. M. Demianiuk: Wykłady z fizyki dla inżynierów cz. I, II, i III, Wyd. WAT 2001
3. M. Demianiuk: Wybrane przykłady zadań do wykładów z fizyki dla inżynierów, Wyd. WAT 2002
4. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: Podstawy fizyki. Cz. I-V, PWN, Warszawa, 2003
5. A. Rogalski: Podstawy fizyki dla elektroników, Wyd. WAT 2002
6. Z. Raszewski: Fizyka ogólna. Przykłady i zadania z fizyki, cz. I. Rozwiązania i odpowiedzi do zadań z fizyki, cz.II. Wyd. WAT 1994
7. Materiały na stronie wydziału WTC: www.wtc.wat.edu.pl

Przedmiot zaliczany jest na podstawie egzaminu, który jest przeprowadzany w formie testowo(TŁ)-ustnej

Ćwiczenia rachunkowe – zaliczenie ćwiczeń rachunkowych odbywa się na podstawie oceny z 2 kolokwii przeprowadzonych na ćwiczeniach oraz aktywności studentów na zajęciach.

Laboratorium – zaliczenie ćwiczenia laboratoryjnego wymaga uzyskania pozytywnej oceny ze sprawdzianu przed rozpoczęciem ćwiczenia, wykonania ćwiczenia i oddania poprawnego pisemnego sprawozdania z ćwiczenia.

Warunkiem dopuszczenia do egzaminu jest uzyskanie pozytywnych ocen z ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych.

Końcowa ocena z przedmiotu jest to ocena z egzaminu uwzględniająca oceny z ćwiczeń rachunkowych i laboratoryjnych.

W przypadku braku dopuszczenia do egzaminu (brak spełnienia rygorów) w terminie egzaminu wpisywana jest ocena NDST a nie NB.

21. Obwody prądów zmiennych

- drgania obwodu LC,
- obwody LRC,
- prąd jednofazowy i prąd trójfazowy,
- wartość skuteczna prądu i napięcia,
- zasada działania transformatora.



Obwody RLC

W poprzednim semestrze podczas omawiania oscylacji harmonicznych badaliśmy ruch drgający układów mechanicznych: wahadło, masa zawieszona na sprężynie, itp.

Teraz zajmiemy się drganiami elektromagnetycznymi, czyli okresowymi zmianami pola elektrycznego i magnetycznego.

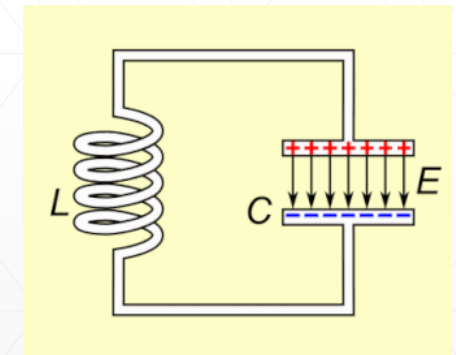
Wiemy jakie zjawiska zachodzą w obwodach **RC** zawierających opornik **R** i kondensator **C** oraz w obwodach **RL** zawierających opornik **R** i cewkę **L** podłączanych do źródła siły elektromotorycznej \mathcal{E} .

Wartości ładunku, natężenia prądu i różnicy potencjałów występujących w tych obwodach rosną lub maleją wykładniczo ze stałą czasową τ .

Zbadajmy dwuelementową kombinację **LC** - cewki i kondensatora.

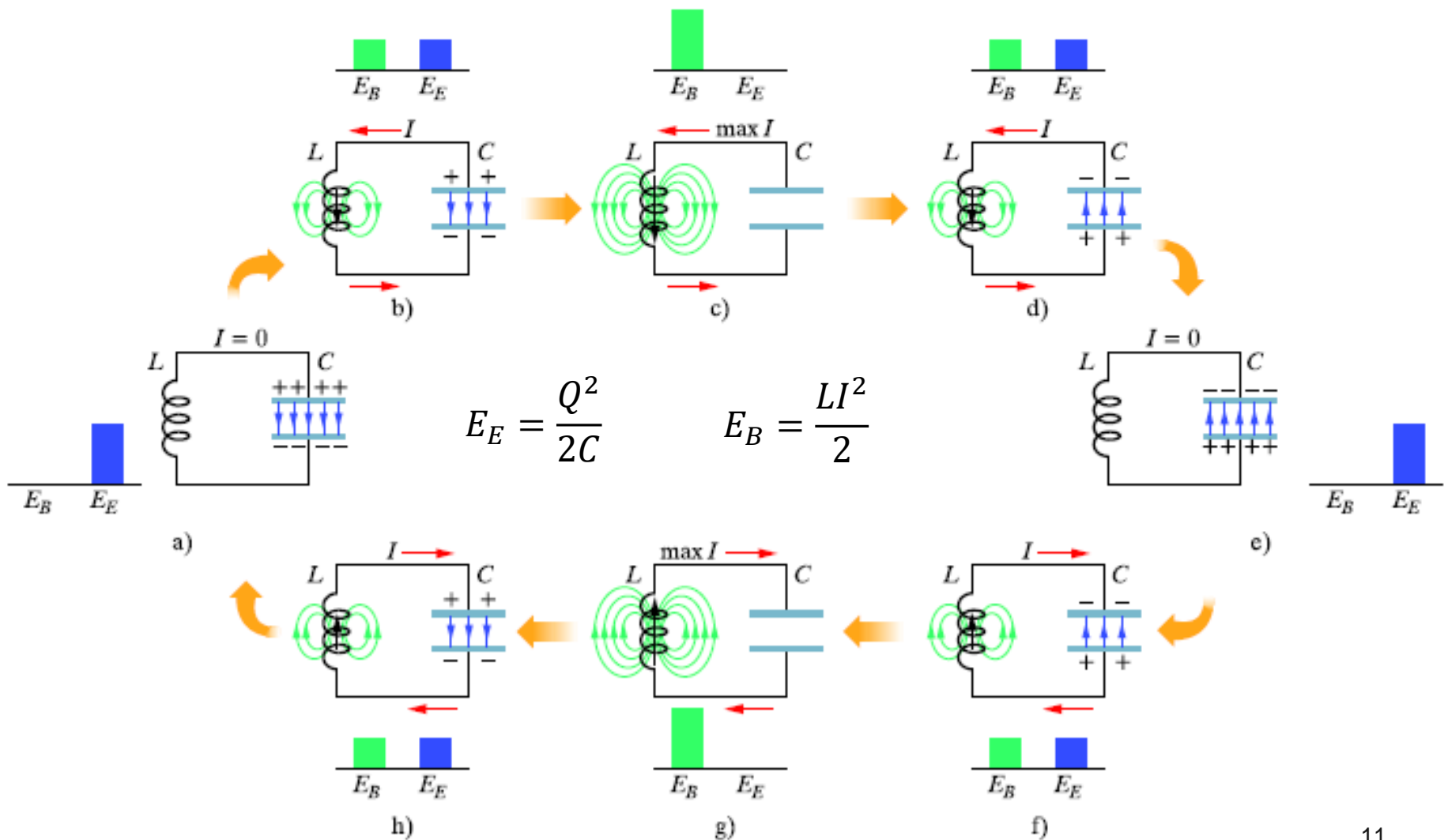
Obwód LC

- Obwód **LC** składa się z cewki o indukcyjności **L** i kondensatora o pojemności **C** połączonych w szereg.
- Naładowany początkowo kondensator ładunkiem **Q** rozładowuje się przez cewkę, w której w wyniku zmian strumienia pola magnetycznego powstaje siła elektromotoryczna indukcji powodująca odwrotne naładowanie kondensatora.
- W wyniku tego w kondensatorze powstaną drgania pola elektrycznego, a w cewce pola magnetycznego nazywane łącznie drganiami elektromagnetycznymi.
- Obwód elektryczny **LC** nazywamy obwodem drgającym.
- Energia pola elektrycznego wynosi: $E_E = \frac{Q^2}{2C}$
- Energia pola magnetycznego wynosi: $E_B = \frac{LI^2}{2}$
- Zgodnie z zasadą zachowania energii całkowita energia układu jest stała, a tylko następuje przepływ energii z kondensatora do cewki i odwrotnie.



$$E = E_E + E_B = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

Fazy cyklu drgań w obwodzie LC



Charakterystyka drgań LC

Skorzystajmy z zasady zachowania energii dla obwodu LC

$$E = E_E + E_B = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$$

Różniczkując po czasie otrzymujemy

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} \right) = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = 0 \quad I = \frac{dQ}{dt}$$

$$\frac{Q}{C} I + LI \frac{d^2 Q}{dt^2} = 0 \quad L \frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{1}{C} Q = 0$$

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} = -\frac{1}{LC} Q \quad \longleftrightarrow \quad \text{ozn. } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2 Q}{dt^2} = -\omega_0^2 Q$$

Otrzymaliśmy równanie różniczkowe drgań harmoniczných, którego rozwiązanie to:

$$Q = Q_0 \cos(\omega_0 t - \phi_0)$$

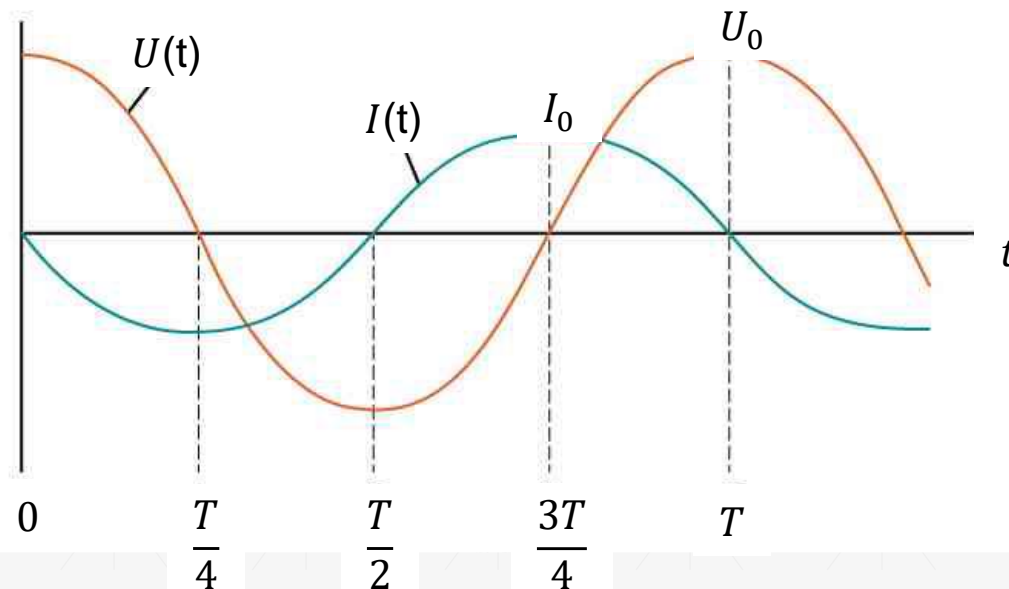
Zmiany prądu i napięcia w obwodzie LC

Ładunek na kondensatorze: $Q = Q_0 \cos(\omega_0 t)$ $\phi_0 = 0$

Napięcie na kondensatorze: $U = \frac{Q_0}{C} \cos(\omega_0 t) = U_0 \cos(\omega_0 t)$

Natężenie prądu w obwodzie LC: $I = \frac{dQ}{dt} = -Q_0 \omega_0 \sin(\omega_0 t) = I_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}\right)$

Pomiedzy prądem i napięciem na kondensatorze istnieje przesunięcie fazowe równe $\pi/2$



Drgania tłumione w obwodzie RLC

Ze względu na straty energii w oporniku drgania w obwodzie będą tłumione.

$$E = E_E + E_B = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} \neq \text{const} \quad \frac{dE}{dt} = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = -I^2 R \quad \text{- moc wydzielana na oporniku}$$

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{LC} Q = 0 \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad \beta = \frac{R}{2L} \quad \text{- współczynnik tłumienia}$$

Dla słabego tłumienia, gdy ($\beta < \omega_0$) rozwiązanie tego równania jest postaci:

$$Q = Q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi) \quad \text{gdzie} \quad \omega^2 = (\omega_0^2 - \beta^2)$$

$$\beta < \omega_0 \rightarrow \frac{R}{2L} < \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Energia elektromagnetyczna zgromadzona w L i C ulega rozproszeniu w postaci energii termicznej na oporniku R tłumiąc drgania (zmniejszając ich amplitudę). 14

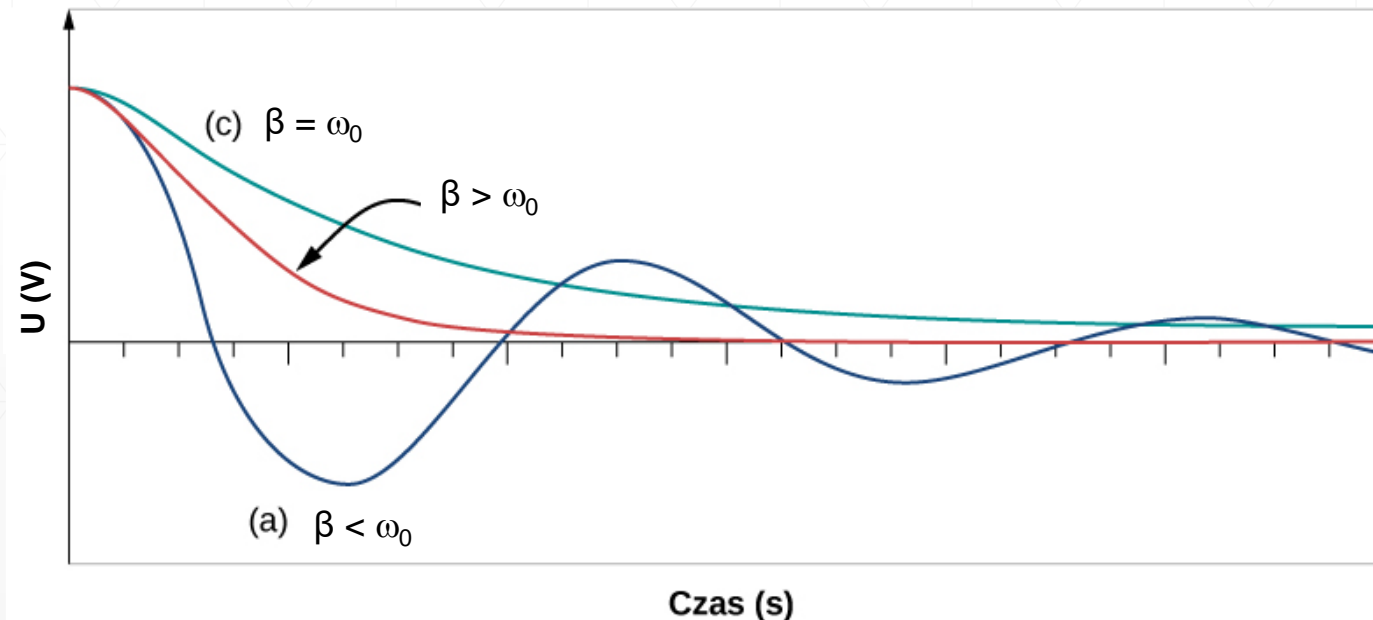
Drgania tłumione w obwodzie RLC

$$Q = Q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi) \quad \beta < \omega_0 \rightarrow R < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = Q_0 e^{-\beta t} (-\beta \cos(\omega t + \phi) - \omega \sin(\omega t + \phi)) \approx -Q_0 \omega e^{-\beta t} \sin(\omega t + \phi) \quad \beta \rightarrow 0$$

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{Q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \phi)$$

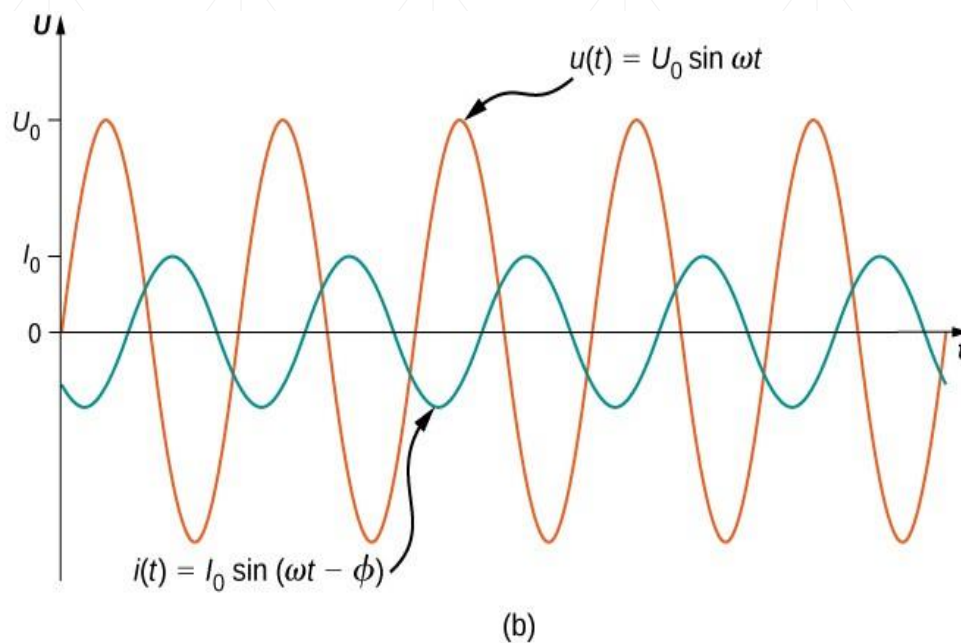
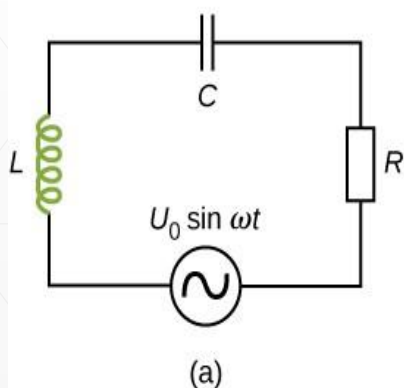
Dla słabego tłumienia pomiędzy prądem i napięciem na kondensatorze istnieje przesunięcie fazowe równe $\pi/2$



Dla silnego tłumienia $\beta \geq \omega_0$ (duże R) ruch aperiodyczny - szybkie tłumienie drgań

Drgania wymuszone w obwodzie RLC

Rozważmy teraz, jak zachowuje się obwód RLC do którego przyłożono napięcie $U_0 \sin \omega t$. W obwodzie takim popłynie prąd zmienny sinusoidalny zwany prądem przemiennym.



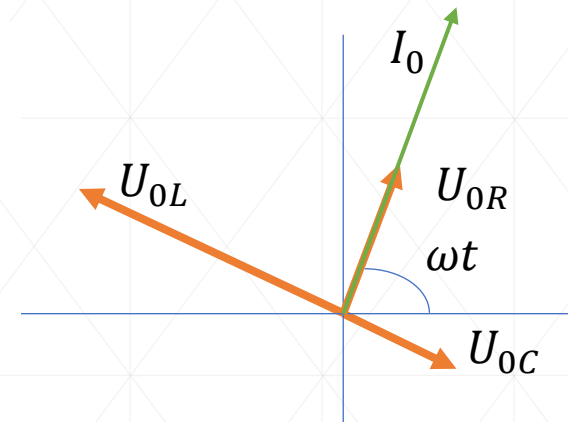
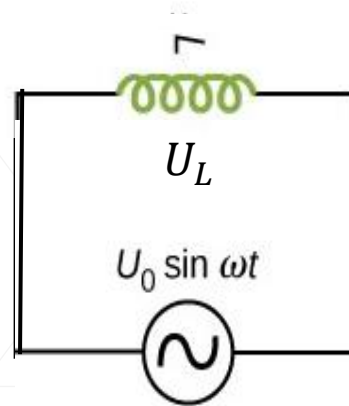
(a) Schemat szeregowego obwodu RLC. (b) Porównanie napięcia wyjściowego na generatorze z natężeniem prądu w obwodzie.

Obciążenie oporowe, pojemnościowe i indukcyjne

Obciążenie oporowe:

$$U_R = U_{0R} \sin \omega t \quad U_{0R} = I_0 R$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = I_0 \sin \omega t \quad \varphi = 0$$



Obciążenie pojemnościowe:

$$U_C = U_{0C} \sin \omega t \quad Q_C = CU_C = CU_{0C} \sin \omega t \quad \varphi = 90^\circ$$

$$I_C = \frac{dQ_C}{dt} = \omega CU_{0C} \cos \omega t = I_0 \sin(\omega t + 90^\circ) \quad U_{0C} = I_0 \frac{1}{\omega C} = I_0 X_C \quad X_C = \frac{1}{\omega C}$$

reaktancja pojemnościowa

Natężenie prądu wyprzedza napięcie o 90°

Obciążenie indukcyjne:

$$U_L = U_{0L} \sin \omega t \quad U_L = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$U_{0L} = I_0 \omega L = I_0 X_L \quad X_L = \omega L$$

reaktancja indukcyjna

$$I_L = \frac{1}{L} \int U_L dt = \frac{U_{0L}}{L} \int \sin \omega t dt = -\frac{U_{0L}}{\omega L} \cos \omega t = I_0 \sin(\omega t - 90^\circ) \quad \varphi = -90^\circ$$

Natężenie prądu w cewce opóźnia się względem napięcia o 90°

Drgania wymuszone w obwodzie RLC

Z prawa Kirchhoffa otrzymujemy:

$$U_L + U_R + U_C = \varepsilon$$

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{Q}{C} = U_0 \sin \omega t$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{RdI}{Ldt} + \frac{1}{LC} I = \frac{\omega U_0}{L} \cos \omega t$$

Postać matematyczna tego równania przypomina równanie mechanicznych drgań wymuszonych, a jego rozwiązaniem jest funkcja:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

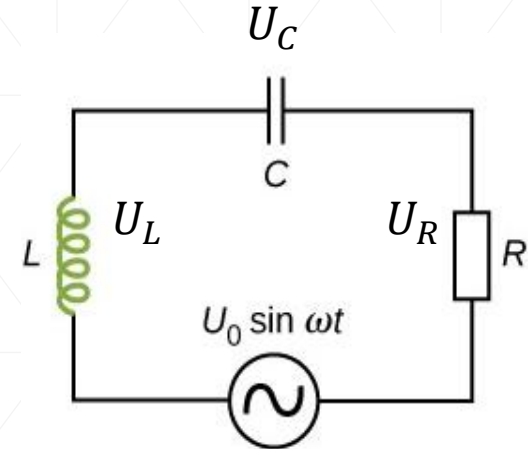
gdzie
$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Mianownik nazywamy impedancją Z obwodu: $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

$$U_0 = I_0 Z$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

gdzie φ to faza początkowa w obwodzie RLC



Rezonans

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Amplituda prądu osiągnie maksimum gdy $X_L = X_C$

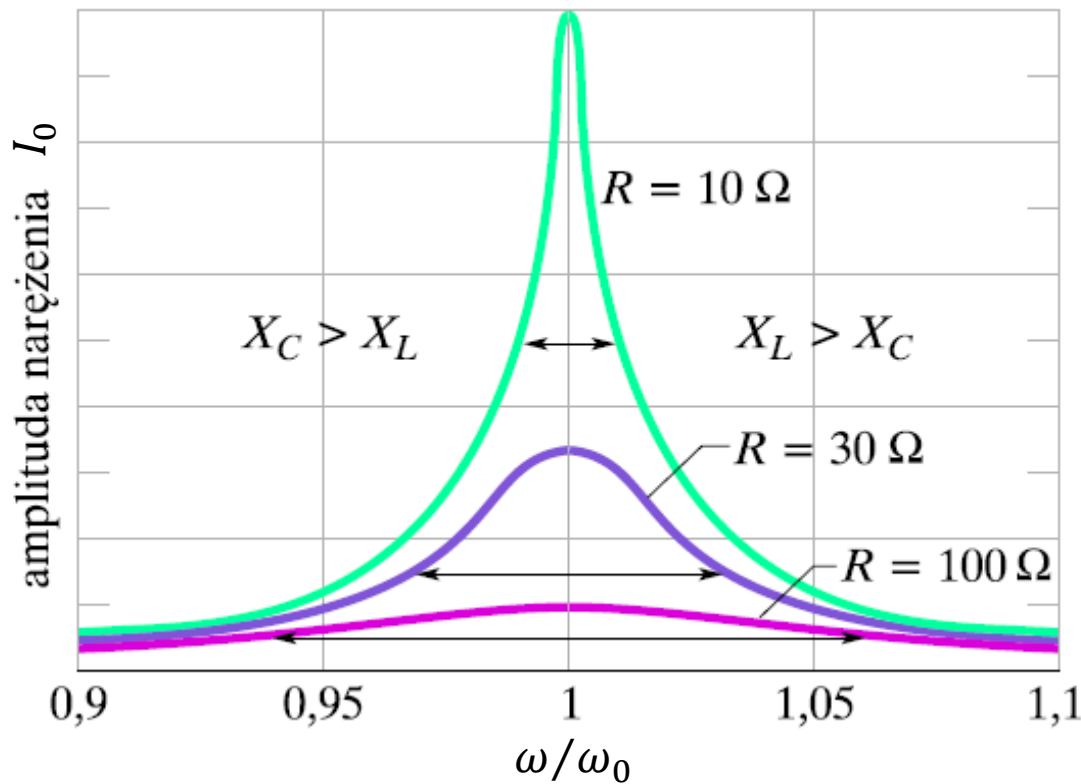
$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

W rezonansie częstota kołowa drgań wymuszonych odpowiada częstoci kołowej drgań swobodnych i amplituda prądu osiąga maksymalną wartość.

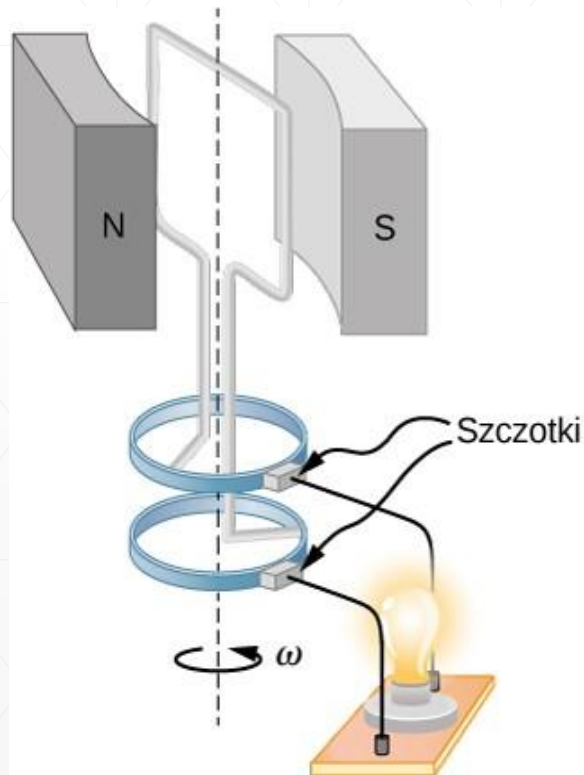


Ze wzrostem rezystancji R rośnie szerokość krzywych rezonansowych oraz maleje I_0 .

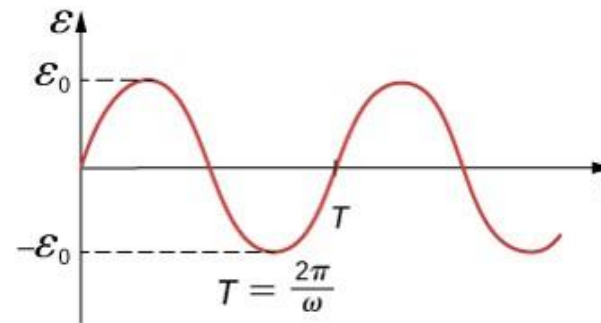
Po lewej stronie punktu $\omega/\omega_0 = 1$ obwód ma charakter pojemnościowy, a po prawej charakter indukcyjny.

Prąd jednofazowy i prąd trójfazowy

Jak wspomnieliśmy, prąd elektryczny przemienny w instalacjach powszechnego użytku wytwarzany jest przez generator. W najprostszym ujęciu uzwojenie nawinięte na ramce obraca się w polu magnetycznym magnesu stałego.



Prąd z ramki jest odbierany przez tzw. **szczotki**, czyli przewodzące bloczki dotykające ramki.

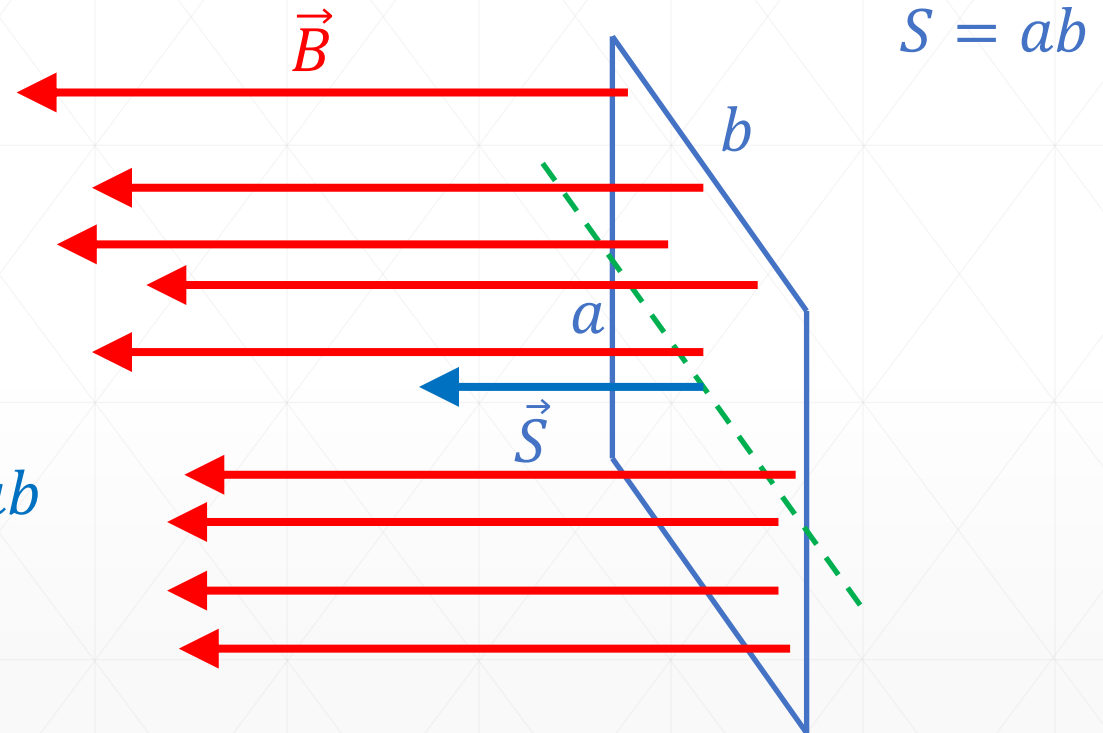


Siła elektromotoryczna wytwarzana w takim generatorze ma przebieg sinusoidalny, a zatem taki sam przebieg ma prąd.

Ramka prostokątna obracająca się w jednorodnym stałym polu magnetycznym

Ramka stoi i strumień pola magnetycznego Φ_B przez ramkę jest największy i stały w czasie.

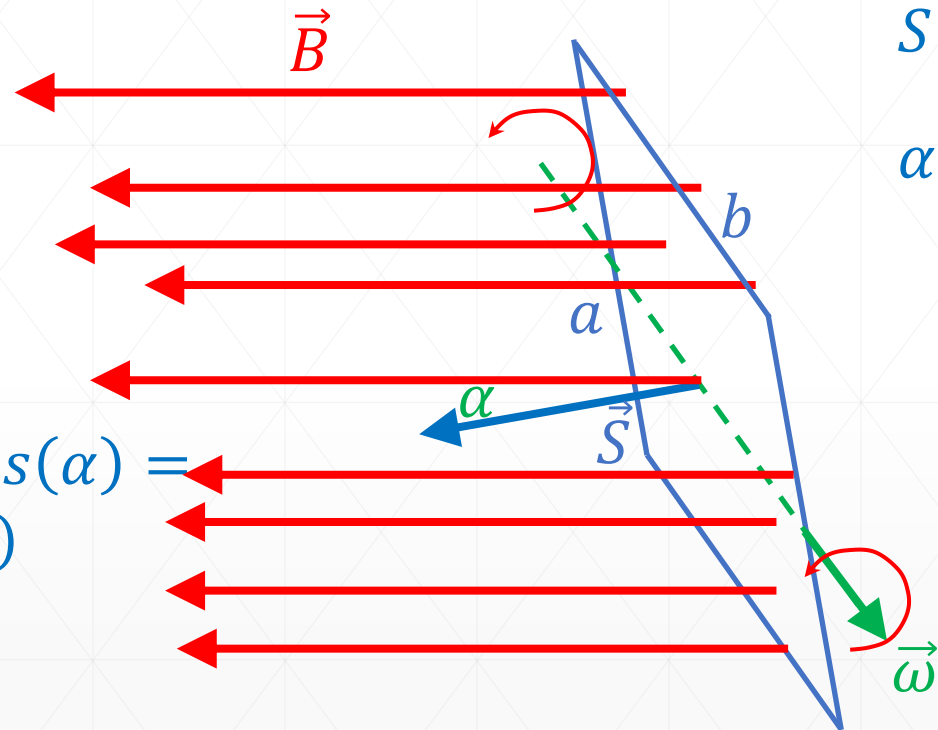
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = Bab$$



Ramka prostokątna obracająca się w jednorodnym stałym polu magnetycznym

Ramka zaczyna się obracać ze stałą prędkością kątową $\vec{\omega}$ to strumień pola magnetycznego Φ_B przez ramkę stopniowo maleje tak jak funkcja **cosinus**.

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = Bab \cos(\alpha) = Bab \cos(\omega t)$$



$$S = ab$$

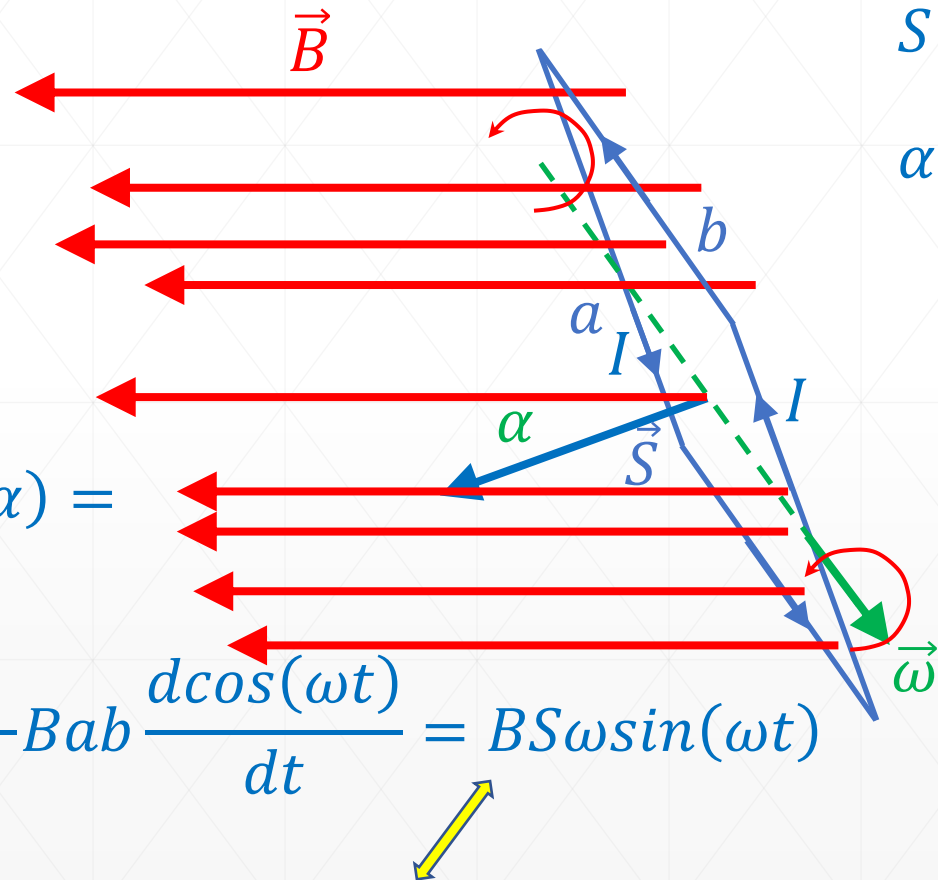
$$\alpha = \omega t$$

Ramka prostokątna obracająca się w jednorodnym stałym polu magnetycznym

Ramka obraca się ze stałą prędkością kątową $\vec{\omega}$, strumień pola magnetycznego Φ_B przez ramkę się zmienia w czasie. Pojawia się siła elektromotoryczna w tej ramce. Strumień jest proporcjonalny do cosinusa, a SEM do sinusa.

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = Bab \cos(\alpha) = Bab \cos(\omega t)$$

$$SEM = \varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -Bab \frac{d\cos(\omega t)}{dt} = BS\omega \sin(\omega t)$$



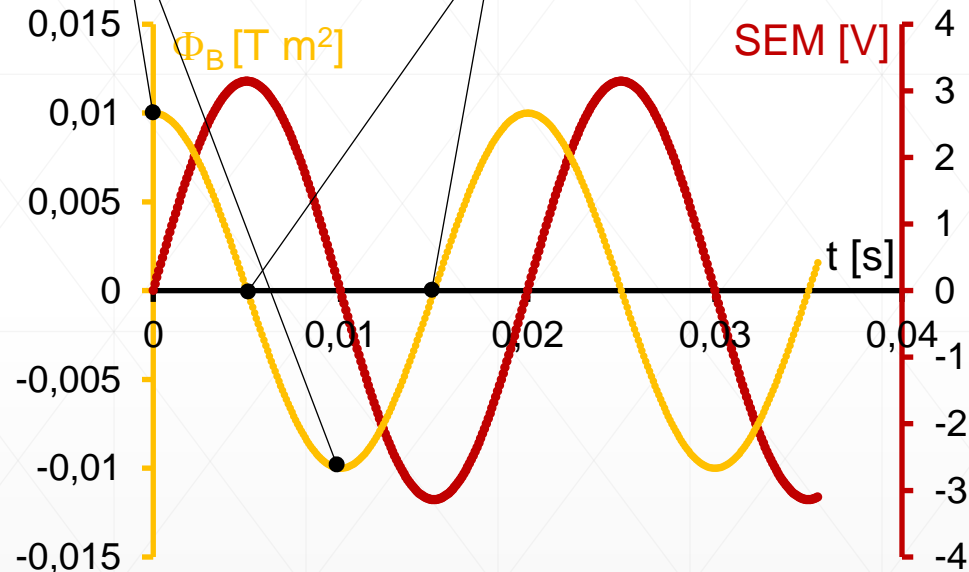
Ważne jest to, że amplituda SEM : $BS\omega$ jest tym większa im większa jest prędkość kątowna ω ramki.

Ramka prostokątna obracająca się w jednorodnym stałym polu magnetycznym

Ramka się obraca ze stałą częstotliwością 50 Hz co oznacza prędkością kątową $\omega = 314,2 \text{ rad/s}$. Pole magnetyczne jest jednorodne i wynosi $B = 1 \text{ T}$. Wymiary ramki wynoszą $a = b = 0,1 \text{ m}$. Na wykresie przedstawiono zależność czasową strumienia pola magnetycznego Φ_B oraz napięcia (**SEM**) indukowanego w ramce.

Ramka prostopadła do pola \vec{B}

Ramka równoległa do pola \vec{B}



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos(\omega t) = 0,01 \cos(314,2 t) [\text{Tm}^2]$$

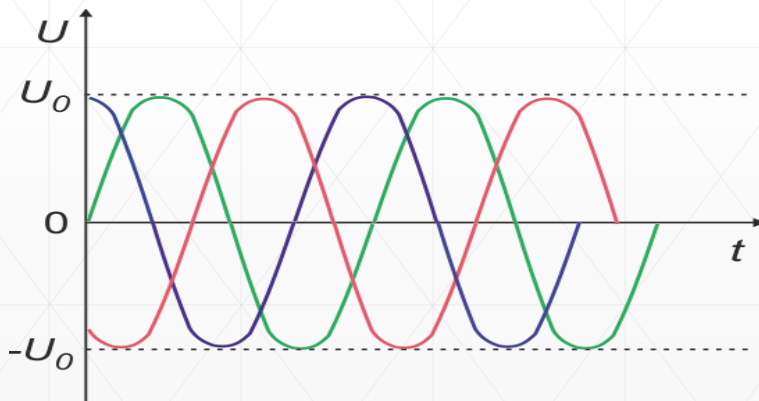
$$SEM = -\frac{d\Phi_B}{dt} = BS\omega \sin(\omega t) = 3,14 \sin(314,2 t) [\text{V}]$$

Wystarczy, że ramka będzie miała N pętli wówczas napięcie wyjściowe wzrośnie N razy.

Prąd jednofazowy i prąd trójfazowy

W Polsce napięcie w sieci jednofazowej wynosi 230 V. Jest ono mierzone między **przewodem fazowym** (kolor izolacji czarny, czerwony lub brązowy) i **przewodem neutralnym** (kolor izolacji jasnoniebieski). Zazwyczaj jest również **przewód ochronny** (kolor izolacji zielonożółty), którego zadaniem jest połączenie instalacji z uziemieniem instalacji. Częstość prądu wynosi 50 Hz.

Wiele urządzeń, również domowych, wymaga wyższego napięcia, wyższej mocy. Rozwiązaniem jest zastosowanie prądu trójfazowego.



— $U = U_0 \sin \omega t$

— $U = U_0 \sin(\omega t + \frac{2}{3} \pi)$

— $U = U_0 \sin(\omega t + \frac{4}{3} \pi)$

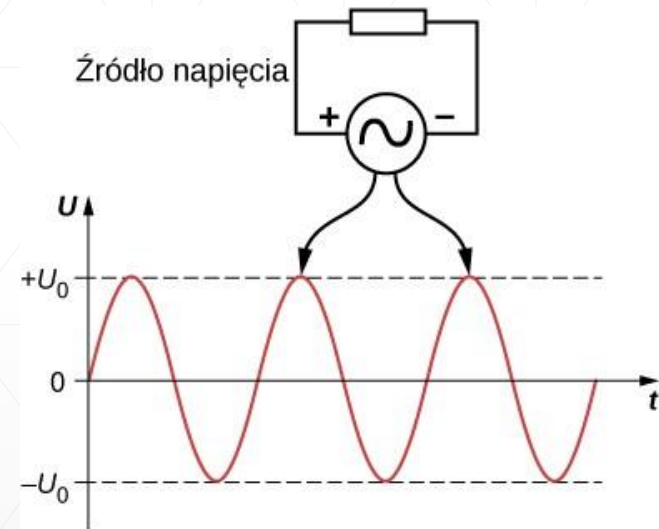
Układ trójfazowy składa się z trzech obwodów prądu przemiennego, w których napięcia źródeł mają tę samą wartość i częstość, ale są względem siebie przesunięte w fazie o 1/3 okresu.

Wartość skuteczna prądu i napięcia

W przypadku źródła sinusoidalnego prądu elektrycznego napięcie wytworzone na rezystorze podłączonym do tego źródła oraz natężenie prądu płynącego przez ten rezystor zmieniają się w czasie sinusoidalnie według formuł:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t)$$

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$



W praktyce okazało się, że przy obliczeniach obwodów elektrycznych prądu przemiennego jak i badaniach eksperymentalnych wygodniej jest posługiwać się tzw. **wartościami skutecznymi** prądu czy napięcia.

Wartość skuteczna prądu i napięcia

Wartością skuteczną danej wielkości nazywamy taką stałą wartość tej wielkości, która w obwodzie o oporze R w ciągu jednego okresu T powoduje wydzielenie tej samej ilości ciepła jak badana wielkość zmienna.

$$P = P_{sr} \quad I_{sk}^2 R = \frac{1}{T} \int_0^T R \cdot I_0^2 \sin^2(\omega t + \varphi) dt,$$

Ponieważ $\int_0^T \sin^2(\omega t + \varphi) dt = T/2$ to:

$$I_{sk} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_0 \approx 0,707 I_0 \quad \text{oraz} \quad U_{sk} = \frac{\sqrt{2}}{2} U_0 \approx 0,707 U_0$$

Natężenie skuteczne – (I_{sk}) prądu przemiennego, to natężenie, przy którym prąd stały wykona pracę W lub wydzieli ciepło Q , równe co do wartości pracy wykonanej przez dany prąd zmienny podczas jednego pełnego okresu zmian.

Średnia moc prądu sinusoidalnie zmiennego

W obwodzie szeregowym RLC moc średnia źródła jest równa szybkości, z jaką energia termiczna jest wytwarzana w oporniku R :

$$P_{\text{śr}} = I_{\text{sk}}^2 R = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi = U_{\text{sk}} I_{\text{sk}} \cos \varphi$$

czynnik $\cos \varphi$ nazywa się współczynnikiem mocy

Wzór ten wyraża tzw. **moc czynną prądu przemiennego**. Zależy ona od różnicy faz między przebiegiem napięcia i prądu. Moc jest największa kiedy nie ma różnicy faz, natomiast równa się zero gdy $\varphi = \pi/2$.

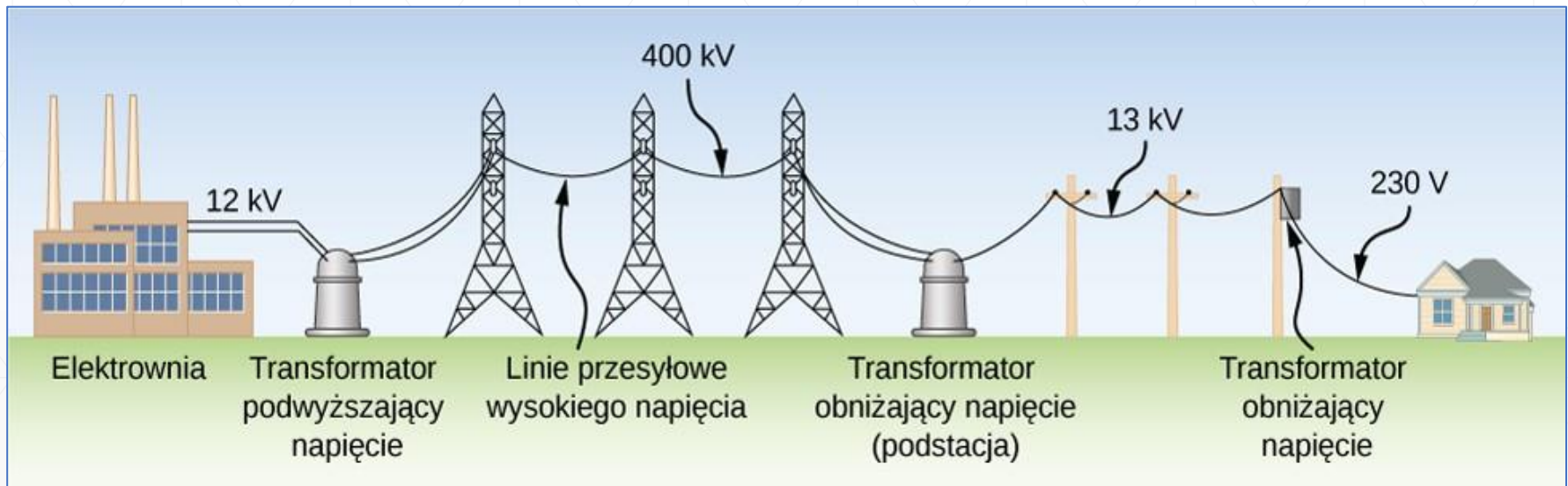
Gdy obwód ma charakter silnie indukcyjny, to warto włączyć szeregowo dodatkową pojemność do obwodu, gdyż zmniejszy się wypadkowa pojemność i faza początkowa.

Przesyłanie energii elektrycznej

Generatory w elektrowni wytwarzają prąd o napięciu kilkunastu kV. Jednakże, aby uniknąć strat ciepłych energii elektrycznej na oporze R przewodnika (prawo Joule'a–Lenza):

$$W = IUt = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t$$

napięcie w długich liniach przesyłowych jest zwiększane do kilkuset kV, a w związku z tym maleje natężenie prądu, a moc pozostaje bez zmian.

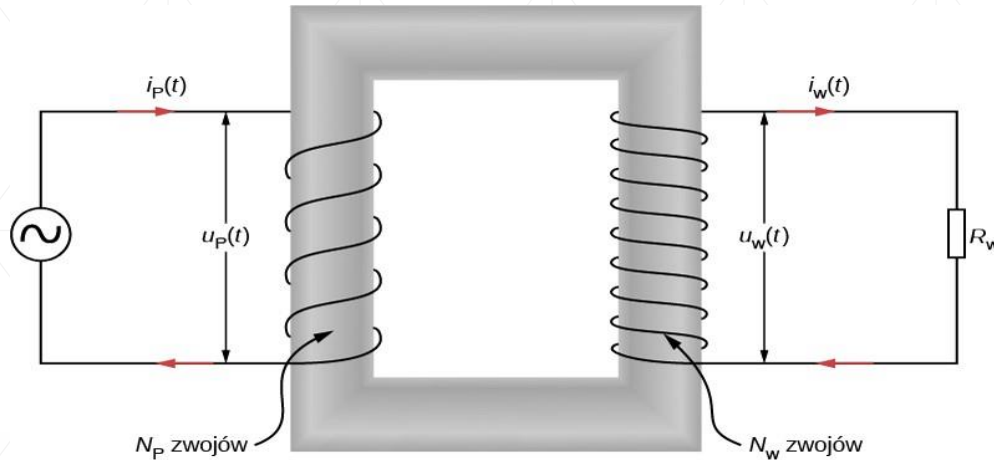


W. Moebs, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.2, openstax, Polska, 2018

Różne urządzenia wymagają zasilania prądem elektrycznym o różnym napięciu, a w naszych domach napięcie w sieci ma ustaloną wartość 230 V.

Zasada działania transformatora

Do podwyższania lub obniżania napięcia służy transformator. Transformator składa się z dwóch oddzielnych cewek (uzwojeń) nawiniętych na wspólny rdzeń ferromagnetyczny.



Uzwojenie pierwotne ma N_P zwojów i jest podłączone do źródła napięcia zmiennego $U_P(t)$. Uzwojenie wtórne ma N_W zwojów i jest podłączone do obciążenia R_W .

W. Moebs, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.2, openstax, Polska, 2018

Zasada działania: zmienny w czasie strumień pola magnetycznego generuje zmienny w czasie pole elektryczne, a zatem zmienny w czasie napięcie elektryczne – **prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya**.

Prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym wytwarza zmienne pole magnetyczne, które indukuje zmienny pole elektryczne w uzwojeniu wtórnym, a więc i prąd. Najczęściej rdzeń transformatora wykonuje się z cienkich, odpowiednio izolowanych blach dzięki czemu zmniejsza się straty powstające na skutek prądów wirowych i histerezy.

Zasada działania transformatora

Transformator jest idealny, gdy nie występują w nim straty energii:

- nie wydzielają się ciepło Joule'a–Lenza,
- nie ma strat związanych z przemagnesowaniem rdzenia oraz
- dzięki nawinięciu na ten sam rdzeń ferromagnetyczny, taki sam strumień pola magnetycznego przepływa przez każdą z pętli uzwojenia wtórnego i pierwotnego.

Napięcie wejściowe $U_p(t)$ jest równe różnicy potencjałów indukowanej na uzwojeniu pierwotnym.

$$U_p(t) = -N_p \frac{d\Phi}{dt}$$

z prawa Faradaya, gdzie Φ jest strumieniem pola magnetycznego przepływającego przez pojedynczą pętlę cewki.

Analogicznie napięcie wyjściowe dostarczane do obciążenia wynosi:

$$U_w(t) = -N_w \frac{d\Phi}{dt}$$

Korzystając z obu powyższych równań, otrzymujemy:

$$U_w(t) = (N_w/N_p) U_p(t)$$

Stosunek: $\frac{U_w}{U_p} = \frac{N_w}{N_p} = k$

nosi nazwę **przekładni transformatora**.

Podsumowanie

1. Drgania w obwodach **LC** i **RLC**.
2. Jak powstaje i czym się charakteryzuje prąd zmienny.
3. Budowa i zasada działania transformatorów.
4. Prąd jednofazowy i prąd trójfazowy – przesyłanie energii.



Dziękuję za uwagę