



Коли ви вмикаєте вдома світло, кімната освітлюється рівним яскравим світлом, тобто світіння ламп не змінюється. Чому ж струм, який іде в лампі, ми називаємо змінним?

1 Змінний електричний струм

Вимушені електромагнітні коливання — це незгасаючі коливання заряду, напруги та сили струму, які спричинені електрорушійною силою, що періодично змінюється:

$$e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де e — значення ЕРС у даний момент часу (миттєве значення ЕРС); $\mathcal{E}_{\max}$ — амплітудне значення ЕРС; ω — циклічна частота змінної ЕРС (рис. 19.1).

Яскравим прикладом вимушених коливань є *змінний електричний струм*.

Змінний електричний струм — електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом:

$$i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

де i — миттєве значення сили струму; $I_{\max}$ — амплітудне значення сили струму; ω — циклічна частота змінного струму, що збігається із частотою змінної ЕРС; φ_0 — зсув фаз між коливаннями струму та коливаннями ЕРС.

На відміну від постійного струму змінний струм увесь час періодично змінює свої значення й напрямок (див. рис. 19.1).

2 Як одержати змінну ЕРС

Джерело електричної енергії, яке створює ЕРС, що періодично змінюється, називають **генератором змінного струму**.

Генератором змінного струму може слугувати дротяна рамка, яка обертається з деякою незмінною кутовою швидкістю ω в однорідному магнітному полі індукцією $\vec{B}$ (рис. 19.2, а). Доведемо, що за цих умов у рамці індукується змінна ЕРС, яка змінюється за гармонічним законом.

За означенням магнітний потік Φ , що пронизує рамку, обчислюється за формулою: $\Phi = BS \cos \alpha$. Нехай у момент початку відліку часу t_1 площина рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції (рис. 19.2, а, положення 1), тобто кут між нормаллю $\vec{n}$ до площини рамки та вектором магнітної індукції дорівнює нулю ($\alpha_0 = 0$). Якщо рамку обертати в магнітному полі, кут α буде змінюватися за законом: $\alpha = \omega t$. Отже, відповідно змінюватиметься і магнітний потік: $\Phi = BS \cos \omega t$.

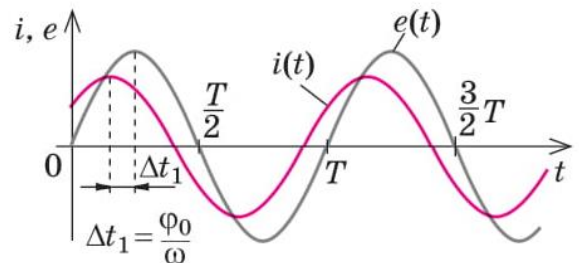


Рис. 19.1. Графіки залежності від часу змінної ЕРС $e(t)$ і сили змінного струму $i(t)$; φ_0 — зсув фаз між коливаннями сили струму та коливаннями ЕРС

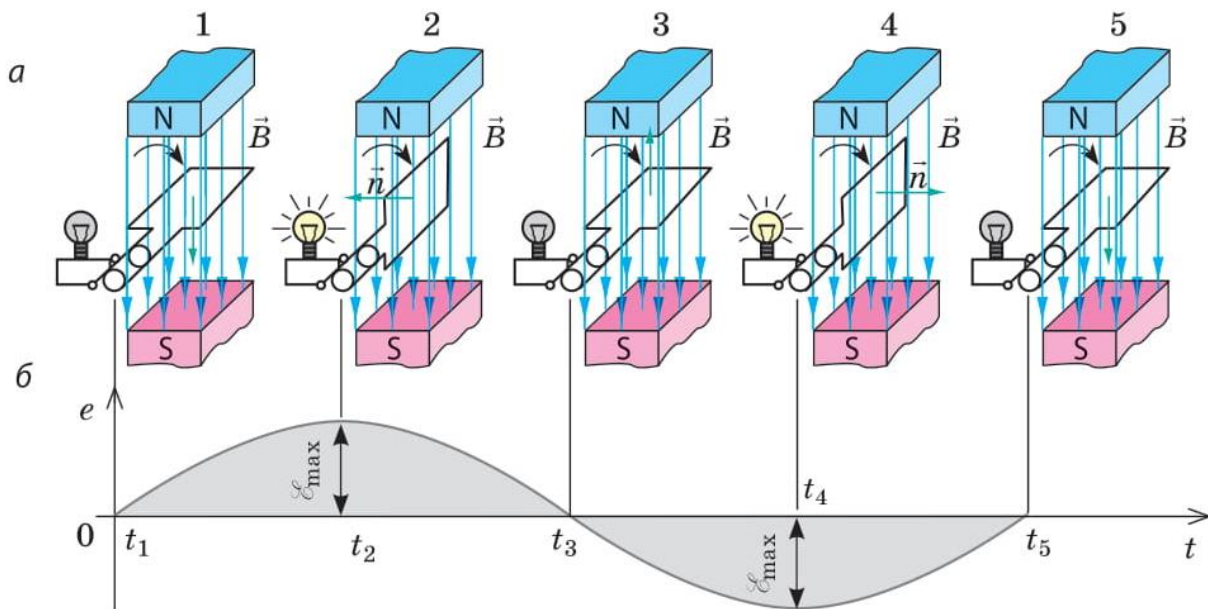


Рис. 19.2. Створення змінної ЕРС індукції в рамці, яка обертається в магнітному полі постійного магніту: а — зміна магнітного потоку, який пронизує рамку; б — графік $e(t)$ — графік залежності ЕРС від часу

Згідно із законом Фарадея, в рамці виникне ЕРС індукції:

$$e(t) = -\Phi'(t) = -(BS \cos \omega t)' = -(-BS\omega \sin \omega t) = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$ — амплітудне значення ЕРС індукції.

ЕРС індукції сягатиме максимального значення в моменти часу t_2 і t_4 , коли рамка буде розташована вздовж ліній магнітної індукції, тобто коли $\alpha = 90^\circ$ (рис. 19.2, а, положення 2 і 4), і перетворюватиметься на нуль у моменти часу t_1, t_3, t_5 , коли рамка буде розташована перпендикулярно до ліній магнітної індукції, тобто коли $\alpha = 0$ або коли $\alpha = 180^\circ$ (рис. 19.2, а, положення 1, 3, 5).

Якщо рамка містить не один, а N витків дроту, то ЕРС індукції дорівнюватиме:

$$e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t,$$

де $\mathcal{E}_{\max} = NBS\omega$ — амплітудне значення ЕРС.

3 Як одержати змінний струм

Якщо до дротяної рамки, що обертається в магнітному полі, за допомогою спеціальних ковзних контактів підключити активне навантаження (наприклад, лампу розжарювання), то електричне коло буде замкненим і в колі виникне змінний електричний струм. Джерелом струму в колі слугуватиме обертова рамка, а споживачем — лампа.

Згідно із законом Ома для повного кола сила струму в лампі визначається за формулою:

$$i(t) = \frac{e}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max} \sin \omega t}{R+r} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t,$$

де R — опір активного навантаження; r — опір джерела (рамки);

$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r}$ — амплітудне значення сили струму.

Оскільки струм змінний, яскравість світіння лампи має періодично змінюватися. Однак, якщо частота зміни струму є досить великою, зміни яскравості не спостерігатимуться.

Зверніть увагу: в колах, які мають ємність та індуктивність, фази коливань сили струму та ЕРС не збігаються (див. [рис. 19.1](#)), тому в загальному випадку миттєве значення сили струму обчислюють за формулою:

$$i(t) = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0).$$

4 Генератори змінного струму

Найпростіший індукційний генератор змінного струму (див. [рис. 19.3](#)) складається з металевого осердя, в пази якого вкладено обмотку (на [рис. 19.3, б](#) цю складову замінено рамкою); кінці обмотки з'єднані з кільцями, до кожного з яких притиснута щітка для відведення напруги до споживача; осердя з обмоткою обертається в магнітному полі нерухомого постійного магніту або електромагніту. Обертову частину генератора називають *ротором*, нерухому частину — *статором*.

Утім генератор такої конструкції має низку суттєвих недоліків:

1) у разі зняття струмів високої напруги виникає сильне іскріння в ковзних контактах (кільце — щітка), що призводить до значних втрат енергії та передчасного зношення;

2) частота змінного струму є досить великою (для споживачів у більшості країн світу $\nu = 50$ Гц), отже, ротор має обертатися із частотою 50 об/с, що важко здійснити технічно.

Для одержання ЕРС індукції не має значення, що слугуватиме ротором — рамка, яка обертається в магнітному полі нерухомого електромагніту, чи електромагніт, який обертається всередині нерухомої рамки. І в тому, і в іншому випадках магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється. Проте сила струму в обмотках електромагніту значно менша від сили струму, який віддає генератор у зовнішнє коло. Тому в сучасних потужних генераторах ([рис. 19.4](#)) ротором є електромагніт, що являє собою великий циліндр, у пази якого вкладено обмотку. До обмотки електромагніту

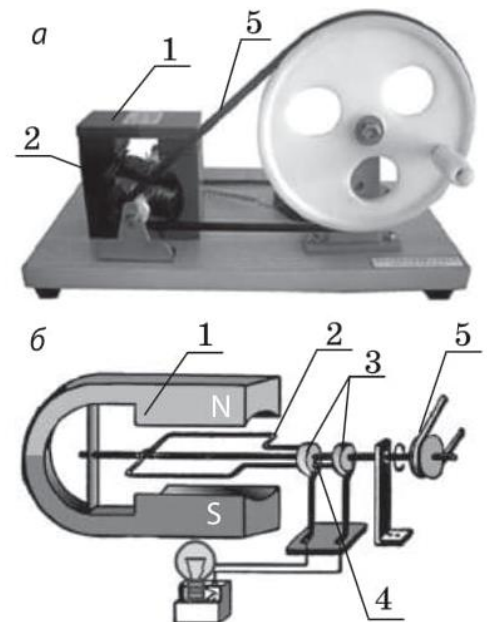


Рис. 19.3. Вигляд (а) і принципова будова (б) найпростішого генератора змінного струму:

1 — нерухомий магніт; 2 — осердя з обмоткою (дротяна рамка), що обертається за допомогою пасової передачі; 3 — кільця; 4 — щітки; 5 — привідний пас

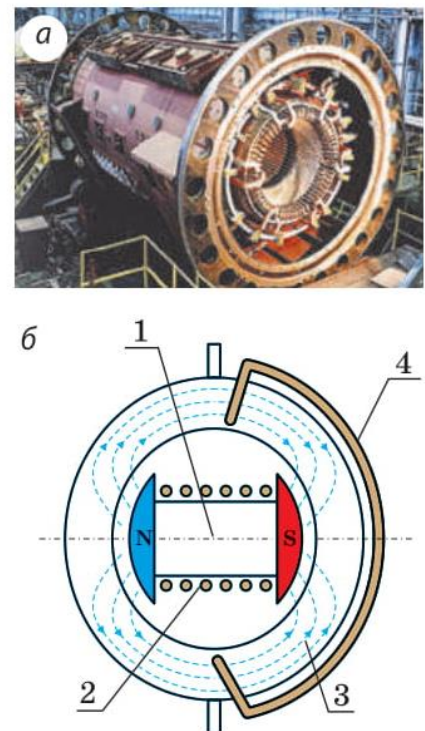


Рис. 19.4. Вигляд турбогенератора (а) і структурна схема двопольного генератора (б): 1 — осердя ротора; 2 — обмотка ротора; 3 — осердя статора; 4 — обмотка статора

через колектор подається напруга від джерела постійного струму — збуджувача. Обмотки статора, в яких створюється ЕРС індукції, вкладають у пази нерухомого порожнистого важкого металевого циліндра, виготовленого, як і осердя електромагніту, з листової сталі (для зменшення струмів Фуко). Обмотку статора легко ізолювати, від неї простіше відвести значний струм у зовнішнє коло.

Швидкість обертання ротора можна зменшити, якщо використати електромагніт, що має декілька пар магнітних полюсів. Частота ν змінного струму, який виробляє генератор, пов'язана з обертовою частотою n ротора генератора співвідношенням:

$$\nu = pn,$$

де p — кількість пар магнітних полюсів генератора.

5 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Рамка площею 100 см^2 містить 60 витків проводу. Рамка рівномірно обертається з частотою 120 об/хв в однорідному магнітному полі індукцією $0,025 \text{ Тл}$. У момент початку відліку часу площина рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Запишіть рівняння залежності магнітного потоку, який пронизує рамку, від часу. Визначте значення ЕРС індукції в рамці через $\frac{1}{24}$ с після початку спостереження. Знайдіть максимальну силу струму в рамці, якщо рамка приєднана до активного навантаження опором 25 Ом , а опір рамки — 5 Ом .

Дано:

$$S = 0,01 \text{ м}^2$$

$$N = 60$$

$$n = 120 \text{ об/хв} = 2 \text{ об/с}$$

$$B = 0,025 \text{ Тл}$$

$$t = \frac{1}{24} \text{ с}$$

$$R = 25 \text{ Ом}$$

$$r = 5 \text{ Ом}$$

$$\Phi(t) \text{ — ?}$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) \text{ — ?}$$

$$I_{\max} \text{ — ?}$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання.

1) Під час обертання рамки магнітний потік, що пронизує рамку, змінюється за законом: $\Phi(t) = BS \cos \omega t$, де $\omega = 2\pi n$ — кутова швидкість обертання рамки.

2) Унаслідок зміни магнітного потоку виникає ЕРС індукції: $e(t) = -N\Phi'(t)$. Миттєве значення ЕРС можна знайти, підставивши в рівняння залежності $e(t)$ відповідне значення t .

3) Згідно із законом Ома максимальне значення сили

$$\text{індукційного струму дорівнює: } I_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R + r}.$$

Перевіримо одиниці, знайдемо значення шуканих величин:

$$[\omega] = \text{с}^{-1}; \quad \omega = 2\pi \cdot 2 = 4\pi \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

$$[\Phi] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{Вб},$$

$$\Phi(t) = 0,025 \cdot 0,01 \cos 4\pi t = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб)};$$

$$e(t) = -60 \cdot (2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t)' = 60 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 4\pi \cdot \sin 4\pi t \approx 0,19 \sin 4\pi t \text{ (В)};$$

$$e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 0,19 \sin\left(4\pi \cdot \frac{1}{24}\right) = 0,19 \sin \frac{\pi}{6} = 0,19 \cdot 0,5 = 0,095 \text{ (В)},$$

$$\mathcal{E}_{\max} = 0,19 \text{ В};$$

$$[I_{\max}] = \frac{\text{В}}{\text{Ом} + \text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}; \quad I_{\max} = \frac{0,19}{25 + 5} \approx 0,006 \text{ (А)}.$$

$$\text{Відповідь: } \Phi(t) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб)}; \quad e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 95 \text{ мВ}; \quad I_{\max} \approx 6 \text{ мА}.$$



Підбиваємо підсумки

Вимушеними електромагнітними коливаннями називають незгасаючі коливання заряду, напруги та сили струму, які спричинені ЕРС, що періодично змінюється: $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$. Прикладом вимушених електромагнітних коливань є змінний електричний струм, сила якого змінюється за гармонічним законом: $i = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0)$.

У провідній рамці площею S , яка обертається в однорідному магнітному полі індукцією B з деякою незмінною кутовою швидкістю ω , індукується змінна ЕРС: $e(t) = -N\Phi'(t) = NBS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$, де N — кількість витків у рамці.

Якщо до рамки, що обертається, приєднати активне навантаження опором R , то в колі виникне змінний електричний струм: $i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t$, де r — опір рамки.

Змінний електричний струм виробляють генератори змінного струму — джерела електричної енергії, які створюють ЕРС, що періодично змінюється.



Контрольні запитання

1. Дайте означення вимушених електромагнітних коливань. 2. Який струм називають змінним? 3. Чому в рамці, що обертається в магнітному полі, виникає змінна ЕРС? 4. Чи залежить, і якщо залежить, то як, максимальне значення змінної ЕРС від кутової швидкості обертання рамки? площі рамки? кількості витків у рамці? опору рамки? 5. Чому в рамці, якщо її замкнути, виникає струм? Від яких чинників залежить сила цього струму? Що в такому колі є джерелом струму? 6. Опишіть будову найпростішого генератора змінного струму. Чому такі типи генераторів не набули широкого застосування? 7. Опишіть будову й основні особливості сучасних генераторів змінного струму.



Вправа № 19

- Визначте, скільки пар магнітних полюсів мають ротори генераторів Дніпрогесу, якщо, здійснюючи 83,3 об/хв, вони виробляють струм частотою 50 Гц (стандартна частота змінного струму у споживчих мережах).
- У рамці, що має 50 витків дроту й рівномірно обертається в магнітному полі, потік магнітної індукції змінюється за законом: $\Phi(t) = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos 100\pi t$. Рамка має опір 2 Ом і замкнена на активний опір 10 Ом. Запишіть рівняння залежностей $e(t)$ та $i(t)$. Знайдіть: а) значення ЕРС в рамці через 5,0 мс після початку спостереження; б) максимальну силу струму в рамці; в) силу струму через 1,0 мс після початку спостереження.
- У момент часу, коли площа рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції, магнітний потік, що пронизує рамку, є максимальним. Чому ж у цей момент ЕРС індукції дорівнює нулю?
- Дротяна прямокутна рамка розміром 20×30 см, що має 20 витків мідного дроту діаметром 1 мм, розташована в однорідному магнітному полі індукцією 0,5 Тл. Рамку замикають на резистор опором 6,6 Ом і надають обертання із частотою 10 об/с. Визначте максимальну силу струму в рамці, якщо вісь обертання рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції.
- Складіть план проведення експерименту з визначення магнітної індукції поля, в якому обертається рамка зі струмом.