

§ 29. ОБЕРТАННЯ РАМКИ В ОДНОРІДНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ. ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ



Коли ви вмикаєте вдома світло, кімната осягається рівним яскравим світлом. Навіть якщо придивитися до волоска лампи розжарювання, то не помітно, що його світіння змінюється. Чому ж струм, який іде по волоску розжарювання лампи, ми називаємо змінним?

1

Змінний електричний струм

Вимушені електромагнітні коливання — незатухаючі коливання заряду, напруги, сили струму й інших фізичних величин, викликані 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. 29.1).

Яскравим прикладом вимушених коливань є *змінний електричний струм*.

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

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

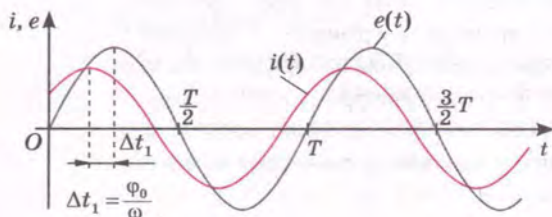


Рис. 29.1. Графіки залежності від часу змінної ЕРС $e(t)$ та сили змінного струму $i(t)$. φ_0 — зсув фаз між коливаннями сили струму та ЕРС

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

На відміну від постійного, змінний струм увесь час періодично змінює своє значення й напрямок (див. рис. 29.1).

2

Як одержати змінну ЕРС

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

Генератором змінного струму може слугувати, наприклад, дрітняна рамка, яка обертається в однорідному магнітному полі індукцією \vec{B} з деякою постійною кутовою швидкістю ω (рис. 29.2, а). Доведемо, що за цих умов у рамці індукватиметься змінна ЕРС, що буде змінюватися 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. 29.2, а, положення 1), тобто кут між нормаллю до площини рамки та вектором магнітної індукції дорівнює нулю ($\alpha_0 = 0$). Якщо рамку обертати в магнітному полі, то кут α буде змінюватися за законом: $\alpha = \omega t$. Отже, відповідно змінюватиметься і магнітний потік:

$$\Phi = BS \cos \omega t.$$

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 досягатиме максимального значення в моменти часу t_2 і t_4 , коли рамка буде розташована вздовж ліній магнітної індукції, тобто $\alpha = 90^\circ$ (рис. 29.2, а, положення 2 і 4), і перетворюватиметься на нуль у моменти часу t_1 , t_3 , t_5 , коли рамка буде перпендикулярною до ліній магнітної індукції, тобто $\alpha = 0$ (рис. 29.2, 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 контактів підключити активне навантаження (наприклад, лампу розжарювання), то електричне коло буде замкнено, і в колі виникне змінний електричний струм. Джерелом струму в колі слугуватиме обертова рамка, а споживачем — лампа.

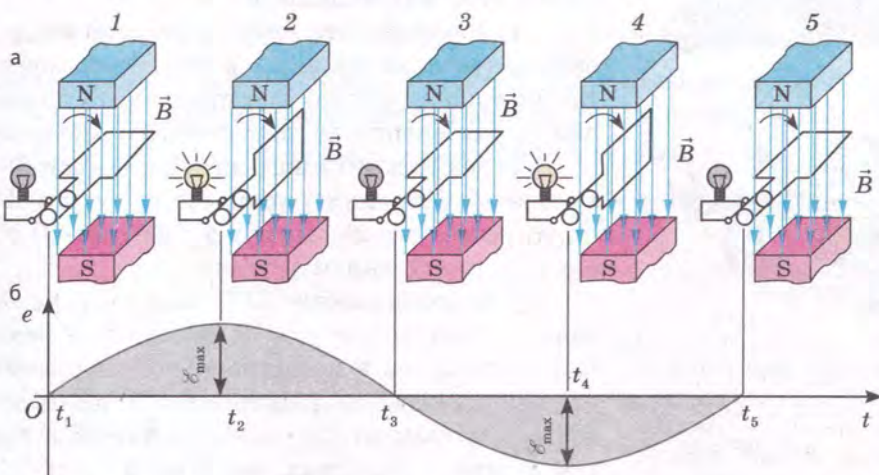


Рис. 29.2. Створення змінної ЕРС індукції в рамці, яка обертається у магнітному полі постійного магніту: а — зміна магнітного потоку, що пронизує рамку; б — графік залежності ЕРС від часу $e(t)$

Згідно із законом Ома сила струму в лампі змінюватиметься за законом:

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

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

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

Оскільки струм змінний, волосок лампи має розжарюватись періодично. Однак, якщо частота зміни струму є досить великою, око людини не буде вловлювати змін розжарення, що ми й спостерігаємо в побутовій електричній мережі.

Зверніть увагу: в колах, що містять ємність та індуктивність, фази коливань сили струму та ЕРС не збігаються (див. рис. 29.1), тому в загальному випадку миттєве значення сили струму обчислюється за формулою:

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

4 Генератори змінного струму

Найпростіший індукційний генератор змінного струму (рис. 29.3) являє собою металеве осердя, в пази якого вкладено обмотку. Кінці обмотки з'єднані з кільцями, до кожного з яких притиснута щітка для відведення напруги до споживача.

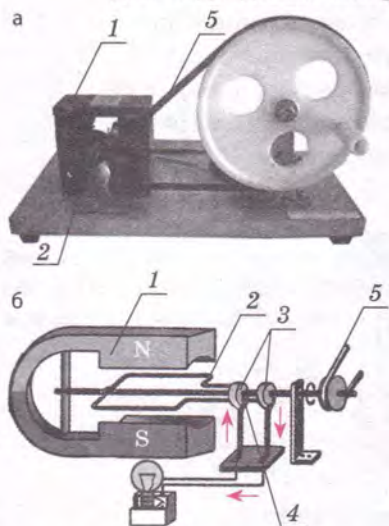


Рис. 29.3. Зовнішній вигляд (а) і будова (б) найпростішого генератора змінного струму: 1 — постійний магніт (електромагніт), який слугує статором; 2 — обертова дрітjana рамка, яка слугує ротором; 3 — кільця; 4 — щітки; 5 — ремінь приводу

Осердя з обмоткою обертається в магнітному полі нерухомого постійного магніту або електромагніту. Обертову частину генератора називають *ротором*, нерухому частину — *статором*.

Однак генератор такої конструкції має низку суттєвих недоліків:

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

2) частота змінного струму є досить великою (у більшості країн світу $\nu = 50$ Гц), отже, ротор має обертатися з 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 за силу струму, який віддає генератор

у зовнішнє коло. Тому в сучасних потужних генераторах (рис. 29.4) ротором є електромагніт, що являє собою великий циліндр, у пази якого вкладено обмотку. До обмотки ротора 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 частотою обертання ротора генератора $\nu_{\text{мех}}$ співвідношенням:

$$\nu = p \nu_{\text{мех}},$$

де p — кількість пар магнітних полюсів генератора.

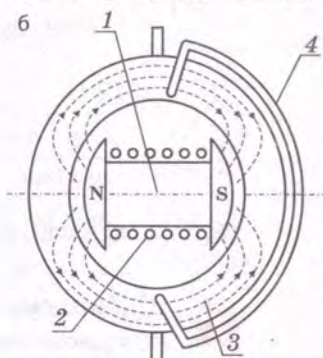


Рис. 29.4. Зовнішній вигляд турбогенератора (а) і структурна схема чотириполюсного генератора (б): 1 — осердя ротора; 2 — обмотка ротора; 3 — осердя статора; 4 — обмотка статора

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Рамка площею 100 см^2 , що містить 60 витків проводу, 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. а) Запишіть рівняння залежності магнітного потоку, який пронизує рамку, від часу; б) визначте значення ЕРС індукції в рамці через $\frac{1}{24}$ с після початку спостереження; в) знайдіть максимальну силу струму в рамці, якщо рамка приєднана до активного навантаження опором 25 Ом , а опір рамки 5 Ом .

$$\Phi(t) - ?$$

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

$$I_{\text{max}} - ?$$

Дано:

$$S = 0,01 \text{ м}^2$$

$$N = 60$$

$$n = 2 \text{ с}^{-1}$$

$$B = 0,025 \text{ Тл}$$

$$t = \frac{1}{24} \text{ с}$$

$$R = 25 \text{ Ом}$$

$$r = 5 \text{ Ом}$$

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання

а) 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.

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

в) Згідно із законом Ома максимальне значення сили індукційного струму дорівнює: $I_{\text{max}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{max}}}{R + r}$.

Визначимо значення шуканих величин:

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

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

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

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

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

$$[I_{\max}] = \frac{\text{В}}{\text{Ом} + \text{Ом}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{В}} = \text{А}; \quad \{I_{\max}\} = \frac{0,19}{25+5} \approx 0,006, \quad I_{\max} = 0,006 \text{ А} = 6 \text{ мА}.$$

$$\text{Відповідь: а) } \Phi(t) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cos 4\pi t \text{ (Вб); б) } e\left(\frac{1}{24} \text{ с}\right) = 0,095 \text{ В; в) } I_{\max} = 6 \text{ мА}.$$

! Підбиваємо підсумки

Вимушеними електромагнітними коливаннями називають незатухаючі коливання напруги та сили струму в колі, викликані ЕРС, що змінюється періодично: $e = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t$. 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 постійною 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 обертової рамки приєднати активне навантаження опором R , то в колі виникне змінний електричний струм:

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}_{\max}}{R+r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t, \text{ де } r \text{ — опір рамки.}$$

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



Контрольні запитання

1. Дайте визначення вимушених електромагнітних коливань.
2. Який струм називається 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 № 25

1. 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?

2. У рамці, що має 50 витків проводу й рівномірно обертається в однорідному магнітному полі, потік магнітної індукції змінюється за законом: $\Phi(t) = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos 314t$. Рамка опором 2 Ом 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.
3. Дротяна прямокутна рамка розмірами 20 × 30 см, що має 20 витків мідного дроту діаметром 1 мм, перебуває в однорідному магнітному полі індукцією 0,5 Тл. Рамку замикають на резистор опором 6,6 Ом і надають обертання з частотою 10 об/с. Визначте максимальну силу струму, що виникає в рамці.
4. Скільки пар магнітних полюсів мають ротори генераторів Дніпрогесу, якщо, здійснюючи 83,3 об/хв, вони виробляють струм стандартної частоти (50 Гц)?
- 5*. Складіть план проведення експерименту з визначення магнітної індукції поля, в якому обертається рамка зі струмом.