

Лекція № 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ

2.1. Принцип роботи електричних машин

Електричні машини поділяються на *машини змінного й постійного струму*. Машини змінного струму поділяють на *синхронні, асинхронні, колекторні*. Найбільше застосування мають синхронні генератори змінного трифазного струму й трифазні асинхронні електродвигуни. Колекторні електродвигуни змінного струму мають обмежене застосування внаслідок складності будови, обслуговування й більш високої вартості. Основною їхньою перевагою є можливість регулювання швидкості обертання в широких межах, що важко досягти в асинхронних двигунах. Електричні машини постійного струму являють собою комбінацію машин змінного струму з механічним випрямлячем – колектором, що є невід’ємною частиною цих машин. За допомогою колектора змінний струм перетвориться в постійний.

Вивчення електричних машин ґрунтується на знаннях фізичної суті електричних і магнітних явищ – перш за все законі електромагнітної індукції. В процесі роботи електричної машини в режимі генератора здійснюється перетворення механічної енергії в електричну. Природа цього явища пояснюється законом електромагнітної індукції: *якщо зовнішньою силою F діяти на поміщений в магнітне поле провідник і переміщувати його (рис. 2.1а), наприклад, зліва направо перпендикулярно вектору індукції B магнітного поля зі швидкістю v , то у провіднику буде наводитися електрорушійна сила ЕРС:*

$$E = Blv,$$

де B – магнітна індукція, Тл; l – активна довжина провідника, тобто довжина його частини, яка знаходиться в магнітному полі, м; v – швидкість руху провідника, м/с.

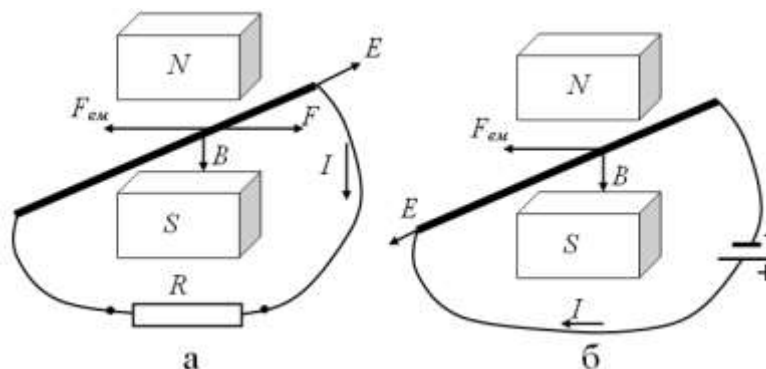


Рис. 2.1. Поняття про «елементарний генератор» (а) та «елементарний двигун» (б)

Для визначення напрямку ЕРС слід скористуватися правилом «правої руки» (рис. 2.1а): *якщо розташувати праву долоню так, щоб відставлений великий палець збігався з напрямом руху провідника, а силові лінії магнітного поля входили в долоню, то напрям індукційного струму в провіднику збіжиться з напрямом витягнутих пальців*. Застосувавши це правило,

визначимо напрямок ЕРС в провіднику (від нас). Якщо кінці провідника замкнені на зовнішній опір R (споживач), то під дією ЕРС в провіднику виникає струм такого ж напрямку.

Таким чином, провідник у магнітному полі можна розглядати в цьому випадку як елементарний генератор. У результаті взаємодії струму I з магнітним полем виникає діюча на провідник електромагнітна сила:

$$F_{\vec{a}i} = BIl.$$

Напрямок сили $F_{\vec{a}i}$ можна визначити за правилом «лівої руки» (рис. 2.16): якщо ліву руку розташувати так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а витягнуті пальці долоні спрямувати в напрямі струму через провідник, то відігнутий великий палець укаже напрям сили, яка діє на провідник у магнітному полі. З рис. 2.1а бачимо, що у розглянутому елементарному генераторі сила $F_{\vec{a}i}$ є гальмівною по відношенню до рухомої сили F .

При рівномірному русі провідника $F = F_{\vec{a}i}$. Помноживши обидві частини на швидкість руху провідника, отримаємо:

$$Fv = F_{\vec{a}i} v,$$

$$Fv = BIlv = EI.$$

Ліва частина рівняння визначає значення механічної потужності, яка витрачається на переміщення провідника в магнітному полі; права частина – значення електричної потужності, яка розвивається в замкненому контурі електричним струмом I . Знак рівності між цими частинами показує, що в генераторі механічна потужність, яка витрачається зовнішньою силою перетворюється в електричну.

Якщо зовнішню силу F до провідника не прикладати, а від джерела електроенергії підвести до нього напругу U , так щоб струм I в провіднику мав напрямок, вказаний на рис. 2.1б, то на провідник буде діяти лише електромагнітна сила $F_{\vec{a}i}$. Під дією цієї сили провідник починає рухатися в магнітному полі. При цьому ми можемо записати:

$$U = E + IR,$$

де E – ЕРС, що індуктується в провіднику, R – електричний опір провідника.

Помножимо обидві частини останнього рівняння на струм I і підставимо значення ЕРС:

$$UI = BIlv + I^2 R$$

або

$$UI = F_{\vec{a}i} v + I^2 R.$$

З цього рівняння випливає, що електрична потужність (UI), яка надходить в провідник, частково перетворюється в механічну енергію, а частково витрачається на покриття електричних втрат в провіднику. Отже, провідник зі струмом, поміщений в магнітному полі, можна розглядати як елементарний електродвигун.

2.2. Виникнення обертового магнітного поля

Однією з основних причин великого поширення трифазної системи є можливість одержання за її допомогою обертового магнітного поля, яке й було використане М. О. Доливо-Добровольським для утворення дуже простого за своєю будовою електродвигуна – так званого асинхронного двигуна.

Якщо взяти три прямокутні рамки, обмотані однаковим числом витків дроту, і, розмістивши їх так, щоб їх площини утворювали між собою кути по 120° (рис. 2.2), приєднати утворені котушки до затисків трифазної сітки, з'єднавши зіркою або трикутником, то магнітне поле у спільному центрі O котушки буде складатися з трьох магнітних полів, створюваних кожною котушкою зокрема. Позитивні напрями цих полів утворюють між собою в просторі кути по 120° .

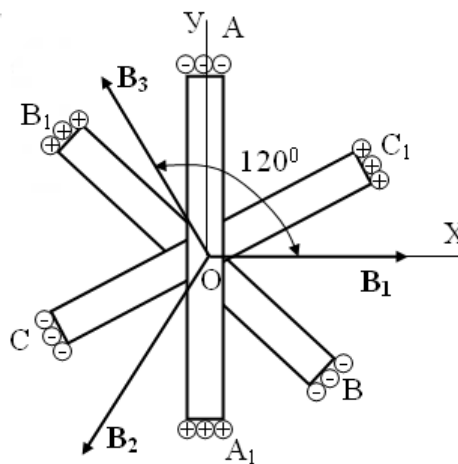


Рис. 2.2. Утворення обертового магнітного поля

Якби рівні за амплітудою змінні струми в котушках збігалися між собою по фазі, ми мали б три пульсуючі поля, сума яких у спільному центрі котушок дорівнювала б нулю. Але через те, що при трифазному струмі пульсуючі поля окремих котушок не тільки мають різні напрями у просторі, але й зміщені між собою по фазі, то сумарне поле у центрі котушок не дорівнює нулю. Наприклад, на момент позитивного максимуму струму у фазі A , коли поле B_1 цієї фази позитивне і також проходить через максимум, струми і поля у фазах B і C негативні, а за величиною дорівнюють половині амплітуди. Пропорційні струмам пульсуючі поля кожної фази можна виразити формулами:

$$B_1 = B_i \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$B_2 = B_i \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$B_3 = B_i \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (2.3)$$

де B_i – однакова для всіх фаз амплітуда пульсуючого поля. Щоб визначити величину і напрям сумарного поля, спроектуємо всі три поля на осі прямокутної системи координат, вісь абсцис якої збігається з позитивним

напрямом поля B_1 .

Горизонтальна проекція сумарного поля

$$B_x = B_{1x} + B_{2x} + B_{3x} = B_1 - B_2 \cos 60^\circ - B_3 \cos 60^\circ = B_1 - \frac{1}{2}(B_2 + B_3),$$

а його вертикальна проекція

$$B_y = B_{3y} + B_{2y} = B_3 \sin 60^\circ - B_2 \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(B_3 - B_2).$$

Але згідно з формулами (2.1–2.3)

$$B_2 + B_3 = B_i (\sin(\omega t + 120^\circ) + \sin(\omega t - 120^\circ)) = B_i \cdot 2 \sin \omega t \cos 120^\circ =$$

$$= B_i \cdot 2 \sin \omega t \left(-\frac{1}{2}\right) = -B_i \sin \omega t \quad i$$

$$B_3 - B_2 = B_i (\sin(\omega t + 120^\circ) - \sin(\omega t - 120^\circ)) = B_i \cdot 2 \cos \omega t \sin 120^\circ =$$

$$= B_i \cdot 2 \cos \omega t \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = B_i \sqrt{3} \cos \omega t.$$

Отже

$$B_x = B_i \sin \omega t + \frac{B_i}{2} \sin \omega t = \frac{3}{2} B_i \sin \omega t$$

$$B_y = \frac{\sqrt{3}}{2} B_i \sqrt{3} \cos \omega t = \frac{3}{2} B_i \cos \omega t.$$

Знаходимо величину вектора сумарного поля

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_i \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t}$$

або

$$B = \frac{3}{2} B_i,$$

яка буде незалежною від часу. При $t=0$ горизонтальна проекція вектора $\vec{B}$ дорівнює нулеві і вектор займає вертикальне положення (в площині котушки A). Із збільшенням t вертикальна проекція вектора зменшується, а горизонтальна зростає, так що вектор $\vec{B}$ відхиляється від вертикалі вправо (за годинниковою стрілкою), тобто в напрямі від позитивної сторони фази A до позитивної сторони фази B . За один період таке поле зробить один повний оберт, а за хвилину $n=60f$ обертів. Таке поле і називається обертовим магнітним полем.

У довільний момент t вектор $\vec{B}$ утворює з своїм початковим положенням кут α , який визначається з умови:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_x}{B_y} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Звідси

$$\alpha = \omega t,$$

тобто вектор $\vec{B}$ обертається з постійною кутовою швидкістю ω в напрямі від фази A до фази B і потім до фази C .

Якщо струми у фазах трифазного двигуна не дорівнюють за амплітудою або зсунуті по фазі не на 120° , то в двигуні теж виникає обертове поле, проте воно обертається у цьому випадку із змінною кутовою швидкістю і його амплітуда періодично змінює свою величину.

Розглянемо графічно механізм виникнення обертового магнітного поля. Залежності струмів в котушках від часу зображені на рис. 2.3. Виберемо чотири моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4 через $1/6$ частину періоду.

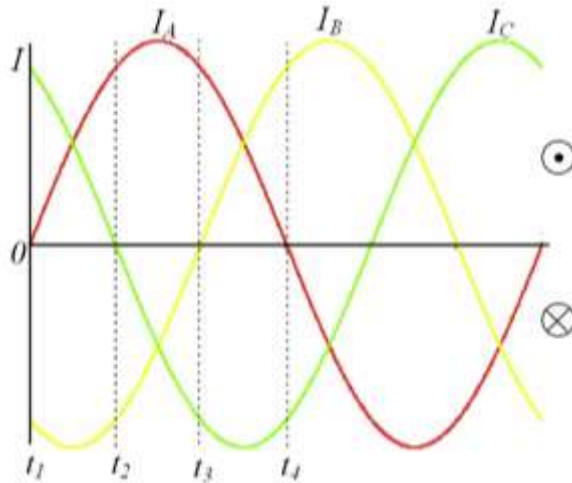


Рис. 2.3. Струми у фазних обмотках статора

Для кожного з цих моментів послідовно опишемо напрямки результуючого магнітного поля (рис. 2.4). Початки обмоток позначені буквами А, В і С, а кінці – Х, Y і Z відповідно. Струм на початку обмотки будемо вважати спрямованим до нас (позначається крапкою), якщо його значення позитивне. Хрестиком позначено напрямок від нас.

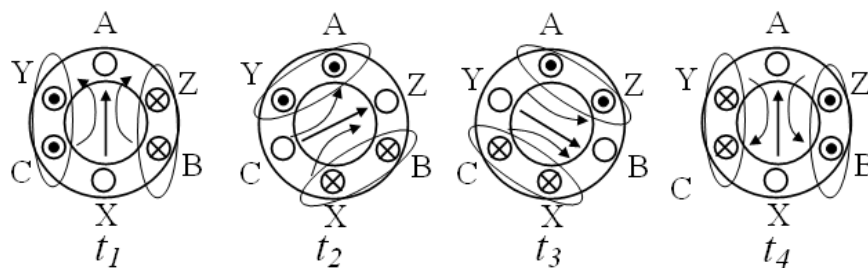


Рис. 2.4. Напрямки магнітного поля в моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4

У момент часу t_1 обмотка А-Х потоку не створює ($I_A=0$). На початку обмотки В струм направлений від нас ($I_B<0$), а в кінці цієї обмотки Y – до нас. На початку обмотки С струм направлений до нас ($I_C>0$), а в кінці цієї обмотки Z – від нас. Таким чином, в двох розташованих поруч провідниках С і Y, перпендикулярних до площини малюнку, струми в момент t_1 спрямовані в одну сторону і створюють магнітне поле, спрямоване за правилом свердлика проти годинникової стрілки, а струми в провідниках В і Z створюють магнітне поле, спрямоване за годинниковою стрілкою. Обидва магнітних поля в центрі мають однаковий напрямок (вгору) і складаються. Напрямок сумарного магнітного поля показано на рис. 2.4 стрілкою.

Визначаючи аналогічним чином напрямок сумарного магнітного поля в моменти часу t_2 , t_3 і t_4 , ми побачимо, що напрямок магнітного поля за половину періоду зміниться на 180° . Легко перекоонатися, що за період напрямок сумарного магнітного поля зробить один оборот і, отже, швидкість обертання магнітного поля в даному випадку буде дорівнює частоті змінного струму.

Цей спосіб створення обертового магнітного поля покладено в основу пристрою трифазних асинхронних двигунів. Якщо поміняти дві будь-які фази місцями (при цьому зміниться послідовність струмів), то сумарний вектор магнітної індукції $\vec{B}$ обертатиметься проти годинникової стрілки. Зміною послідовності фаз користуються для зміни напрямку обертання ротора трифазного асинхронного двигуна, тобто для реверсування.

2.3. Будова та принцип роботи асинхронної машини

Трифазні асинхронні машини були розроблені у 1888 р. М.О. Доливо-Добровольським. *Асинхронна машина* – це машина змінного струму, в котрій збуджується обертове магнітне поле, при цьому ротор і магнітне поле обертаються з різними швидкостями, тобто асинхронно.

Асинхронні машини принципово можуть бути генераторами або двигунами. Характеристики асинхронних двигунів (АД) дуже добрі, і вони широко застосовуються в техніці. Асинхронні генератори практично не використовуються, тому що мають дуже низькі експлуатаційні якості.

Основними конструктивними елементами АД є *нерухомий статор і обертовий ротор*. Статор складається із станини, що є одночасно корпусом двигуна, і закріплених у ній магнітопроводу і обмотки. Ротор АД складається з пакета магнітопроводу і обмотки. Залежно від типу обмотки ротор АД може бути короткозамкненим або фазним. У пази короткозамкнених роторів вкладені мідні стрижні, що з'єднуються з торців короткозамкненими кільцями; така обмотка має вигляд клітки (рис. 2.5а).

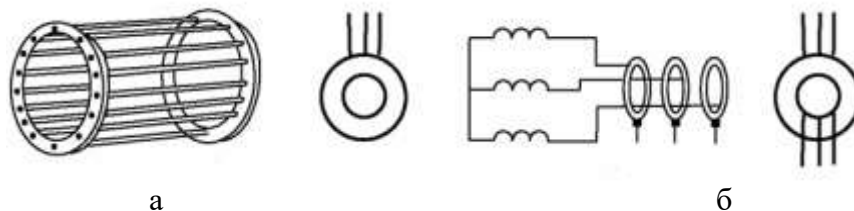


Рис. 2.5. Обмотки ротора АД: а – короткозамкнена; б – з фазним ротором

У пази фазного ротора укладають провідники секцій трифазної обмотки, що з'єднуються в «зірку» (рис. 2.5б). Вільні виводи фаз обмотки ротора приєднують до трьох ізольованих одне від одного контактних кілець. На кільця накладені закріплені в щіткотримачах щітки, за допомогою яких обмотки ротора з'єднуються з регулювальним або пусковим реостатом. Умовне графічне позначення асинхронного двигуна з фазним ротором

наведене на рис. 2.5б.

Принцип роботи асинхронної машини заснований на використанні обертового магнітного поля. Нерухома обмотка статора асинхронного двигуна, сполучена з мережею напруги, створює обертаючий магнітний потік, який перетинає обмотки ротора і наводить у них ЕРС, що створює струми ротора. Взаємодія струмів ротора з магнітним потоком машини створює момент, що обертає ротор. Якщо швидкості обертання ротора і поля статора однакові, то магнітний потік нерухомий відносно обмотки ротора і не наводить у ній струмів, унаслідок чого не виникає обертаючого моменту. Тому ротор і поле статора завжди обертаються асинхронно, тобто з різною швидкістю.

Станина виготовляється з чавуну, сталі або алюмінію. Осердя статора набирається з тонких пластин спеціальної електротехнічної сталі, які ізолюються одна від одної (щоб запобігти втратам енергії). На внутрішній стороні осердя є канавки, в які закладаються провідники статорної обмотки. Статорна обмотка виготовляється із мідного дроту або мідної шини і складається із трьох частин, які називаються фазами статорної обмотки. Передбачається можливість вмикання фаз цієї обмотки за схемою «зірка» (рис. 2.6а) або «трикутник» (рис. 2.6б) залежно від напруги в електричній мережі. Початки фаз позначаються C_1, C_2, C_3 , а їх кінці – C_4, C_5, C_6 .

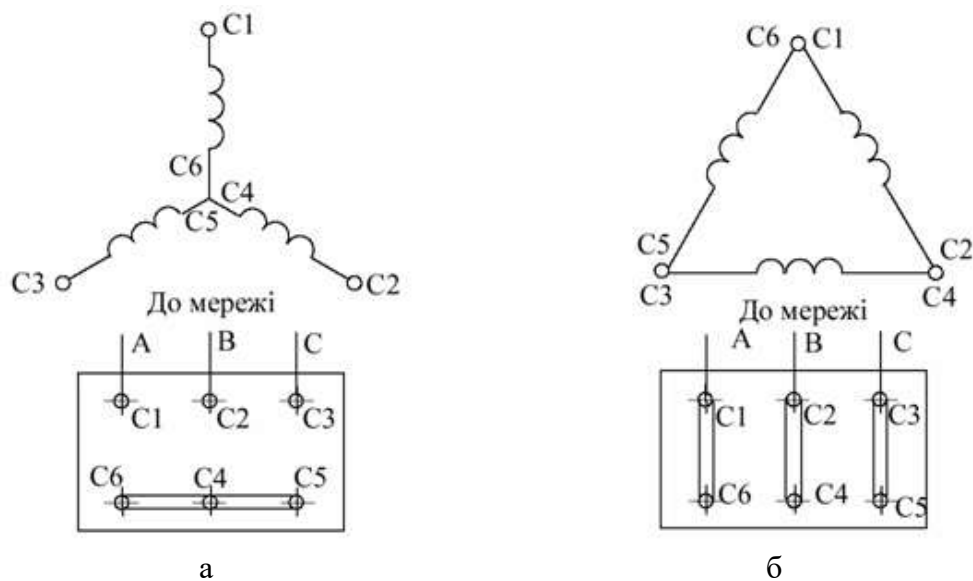


Рис. 2.6. Вмикання фаз АД за схемою «зірка» (а) та «трикутник» (б)

Обмотки двигунів малої та середньої потужності виготовляються на напруги 380/220 і 220/137 В. Напруга в знаменнику відповідає номінальній напрузі фази двигуна. Тому при лінійній напрузі мережі 380 В, двигун напругою 380/220 В сполучаємо зіркою ($U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \sqrt{3}$), при лінійній напрузі мережі 220 В – трикутником ($U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$). Аналогічно для двигуна напругою 220/137 В: при лінійній напрузі 220 В обмотку двигуна сполучаємо зіркою, а при лінійній напрузі 137 В – трикутником.

2.4. Основні параметри та характеристики трифазного асинхронного електродвигуна

До основних параметрів трифазного асинхронного двигуна відносяться: ковзання, частота ЕРС і струму в обмотці ротора, ЕРС статора і ротора, електромагнітний момент.

При підключенні до статора двигуна трифазного струму всередині машини виникає трифазне обертаюче поле статора n_1 . Швидкість обертання магнітного поля статора n_1 визначається за формулою:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},$$

f_1 – частота мережі, що живить статор; p – число пар полюсів статора.

У робочому режимі швидкість обертання ротора асинхронного двигуна n_2 [об/хв] менша, ніж швидкість обертання магнітного поля статора n_1 , [об/хв]. Швидкість n_1 , обертання магнітного поля статора називають *синхронною швидкістю обертання*.

Ступінь відставання ротора від обертання магнітного поля статора характеризується ковзанням, яке позначається літерою S . Ковзання визначається за формулою

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

При номінальному навантаженні ковзання переважно невелике і становить 0,02-0,05, тобто частота обертання ротора близька до синхронної (до n_1). В загальному випадку величина ковзання двигуна знаходиться в межах $S=1$ при нерухомому роторі ($n_2=0$) і $S=0$ – при синхронній швидкості ($n_2=n_1$). Синхронна частота обертання може бути одержана, якщо ротор обертати за допомогою іншого двигуна. Якщо збільшити n_2 вище від синхронної, то електрична машина перейде в генераторний режим. Отже для генераторного режиму $n_2 > n_1$ і $S < 0$. Тобто, асинхронна машина, як і всі електричні машини, оборотна, тобто якщо: $n_2 > n_1$ – машина працює в режимі генератора; $n_2 = n_1$ – штучний режим ідеального неробочого ходу; $n_2 < n_1$ – машина працює в режимі двигуна. Якщо, гальмуючи ротор, зупинити його ($S=0$), і почати обертати сторонньою силою в протилежний обертання поля бік, то машина перейде в режим електромагнітного гальма. В цьому режимі $n_2 < 0$ (при $n_1 > 0$) та $S > 1$.

З останньої формули можна знайти швидкість обертання ротора при навантаженні:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60 f_1}{p}(1 - S).$$

Поле статора обертається відносно ротора зі швидкістю:

$$n = n_1 - n_2 = n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1 S.$$

Відповідно до цієї швидкості в обмотці ротора наводиться ЕРС і струм,

частота яких називається частотою ковзання, може бути обчислена за формулою:

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{pn_1}{60} S = f_1 S.$$

Частота струму в роторі пропорційна ковзанню, тобто залежить від навантаження двигуна. При холостому ході, коли ковзання меле, частота струму в роторі біля 1 Гц. При пуску, коли ковзання рівне 1, частота струму в роторі буде рівною частоті струму в статорі:

$$f_2 = sf_1 = 1 \cdot 50 = 50 \text{ Гц}.$$

Контрольні запитання до лекції № 2

1. Поясніть механізм виникнення обертового магнітного поля?
2. Як змінити напрям обертання магнітного поля?
3. Що таке асинхронна машина?
4. Поясніть принцип роботи асинхронної машини?
5. Зобразіть схематично вмикання статорної обмотки за схемою «зірка» та «трикутник»?
6. В чому полягає різниця між короткозамкненою і фазною роторною обмоткою?
7. Поясніть принцип дії асинхронної машини.
8. Запишіть формулу визначення швидкості обертання магнітного поля статора.
9. Що таке ковзання і за якою формулою його можна визначити?
10. Запишіть умови при яких асинхронна машина працює в режимі двигуна, генератора і електромагнітного гальма?