

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни  
«Основи електрики та електроніки, електричні  
вимірювання та їх стандартизація»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**за темою № 14 - Електричні машини**

**Кременчук 2023**

### **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

### **СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

### **ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії Авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, спеціаліст вищої категорії, Юрко О.О.

### **Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

### **План лекції:**

1. Принцип дії асинхронного двигуна.
2. Створення обертового магнітного поля.
3. Будова асинхронних двигунів
4. Синхронні машини.

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г., Гончаров Є. В. Основи електротехніки, електроніки та мікропроцесорної техніки. Харків: Планета-Прінт, 2019. 248 с.
2. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: Підручник. Київ: ІВЦ Видавництво "Політехніка", 2003. 338 с.
3. Кармазін В.В., Семенець В.В. Курс загальної фізики. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. Київ: Кондор, 2016. 786 с.
4. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл. Ч. 1. Харків: Компанія СМІТ, 2008. 432 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
6. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 133 с.

#### **Допоміжна:**

1. Андріяшик М. В., Вербицький Б. І., Король А.М. Курс фізики. Київ: Фламенко, 2008. 530 с.
2. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: Підручник. Львів: Видавництво "Бескид Бит", 2004. 880 с.
3. Гумен Б. М., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: у 3 кн. Київ: Вища шк., 2003.
4. Дмитрієва В. Ф. Фізика: Навч. посіб, Київ: Техніка, 2008. 648 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. <https://www.youtube.com/channel/UCWfhBu4fAt126ZbxREz3IBw>

## Текст лекції

### 1. Принцип дії асинхронного двигуна.

Серед сучасних машин змінного струму широко використовуються трифазні асинхронні електродвигуни внаслідок простоти їх будови та керування. Основними частинами такого двигуна є: статор, що має 3 котушки; ротор; підшипники та підшипникові кришки; повітряний нагнітач; клемний щиток.

Конструкцію такого двигуна вперше розробив М.О. Доливо-Добровольський у 1891 році.

Принцип дії двигунів ґрунтується на використанні законів:

1. Механічної взаємодії струмів, який досліджував Ампер у 1821 р.
2. Електромагнітної індукції - досліджений Фарадеєм у 1831 р.
3. Теоретичного узагальнення цих явищ про напрям індуктивного струму, що здійснив Ленц у 1834 р.

Принцип дії асинхронного двигуна пояснимо на моделі, зображеній на рис. 1. Магнітне поле, створене постійним магнітом, зосереджене між двома полюсами  $N$  та  $S$ . Воно перетинає провідну рамку, що може обертатися на осі. Вектор магнітної індукції  $B$  направлений від північного полюса магніту до південного.

Якщо обертати постійний магніт, а отже вектор магнітної індукції  $B$ , зі швидкістю  $n_1$  обертів за хвилину за годинниковою стрілкою, то поле перетинатиме обмотку ротора і індукуватиме в рамці ЕРС  $e = Blv \sin \alpha$ . Так як рамка є замкнутим контуром, то в ній протікатиме індукційний струм  $I_2$ .

Визначимо напрям протікання струму рамки. Згідно рис. 1, відносний рух рамки, тобто активних її провідників, протилежний до напрямку обертання магніту. Тобто рамка обертається відносно магніту проти годинникової стрілки. Тому, згідно правила правої руки, струм у верхній частині провідника рамки направлений до нас (о), у нижньому провіднику рамки - від нас (+).

З фізики відомо, що на провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера  $F = BIl \sin \alpha$ . Застосувавши правило лівої руки, визначимо напрям діючої пари сил  $F_1$  і  $F_2$ , які виникають у наслідок дії магнітного поля на рамку зі струмом.

На рис. 1 видно, що ці сили утворюють обертовий момент, що діє на рамку у напрямку обертання вектора магнітної індукції. Унаслідок дії пари сил рамка почне обертатися з частотою  $n_2$ . Якщо обертова рамка наздожене обертове поле магніту, і швидкість їх обертання буде синхронною, то обертове поле не буде збуджувати ЕРС, індукційний струм не буде

протікати, зникне й обертовий момент, що діяв на рамку. Отже, рамка обертається зі швидкістю  $n_2$ , дещо меншою від швидкості обертання поля магніту  $n_1$ . Тому двигуни, побудовані на такому принципі дії, називаються асинхронними.

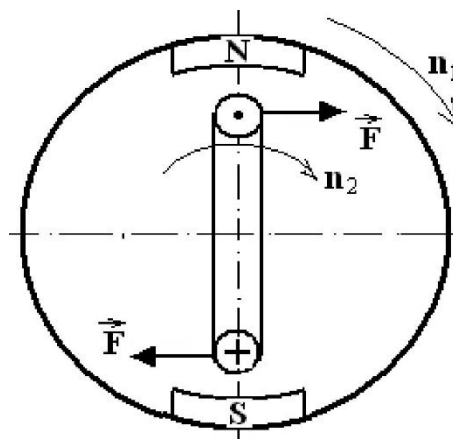


Рисунок 1 – Схема-модель до пояснення принципу дії асинхронного двигуна

Явище відставання рамки (ротора) від обертового поля (поля статора) називається ковзання і позначається літерою  $S$ .

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

де  $n_1$  - частота обертового магнітного поля.

$n_2$  - частота обертання ротора.

Під час пуску  $n_2 = 0$ , тому  $S = 1$ .

При холостому ході  $n_2$  майже дорівнює  $n_1$ , тому ковзання дуже мале.

При номінальному навантаженні  $S_n = 2 \dots 6\%$ .

Залежно від значення ковзання асинхронна машина може працювати у трьох режимах: двигуна, генератора та електромагнітного гальма. У режимі двигуна ( $1 > S > 0$ ) машина перетворює електричну енергію в механічну. Ротор при ньому обертається асинхронно (повільніше магнітного поля) з такою частотою, щоб струми ротора взаємодіяли з обертовим магнітним полем статора, створювали обертовий магнітний момент, що зрівноважує гальмуючий момент від сил тертя та навантаження на валу  $n_1 > n_2$ .

У режимі генератора  $n_2 > n_1$ , машина перетворює механічну енергію в електричну. Ротор обертається у напрямі обертання магнітного поля статора з частотою більшою, ніж частота обертання поля, для цього треба прикласти обертовий момент до ротора.

У режимі електромагнітного гальма, при зміні ковзання від  $s = -1$  до  $s = 0$ , ротор змушений обертатися у напрямі, протилежному напрямку обертання магнітного поля статора. У такому режимі значна частина енергії розсіюється

в обмотках, витрачається на гістерезис та вихрові струми.

Отже, асинхронна машина, це машина, у якій створюється обертове магнітне поле, яке збуджує індуктивний струм у роторі, при цьому виникає механічний обертовий момент, при умові, що ротор обертається асинхронно, тобто з кутовою швидкістю, що відрізняється від кутової швидкості поля.

Обертове магнітне поле створюється завдяки певному розташуванню обмоток статора і протіканню по них змінного електричного струму.

## 2. Створення обертового магнітного поля.

Розглянемо на простих прикладах, як створюється обертове магнітне поле. Нехай електричний струм у рамці змінюється за законом синусів  $i = I_{\max} \sin \omega t$ . Зобразимо схематично провідну рамку (котушку ротора) так, як би ми бачили її з торця (рис. 2). Позначимо початок обмотки літерою П, а кінець її - літерою К.

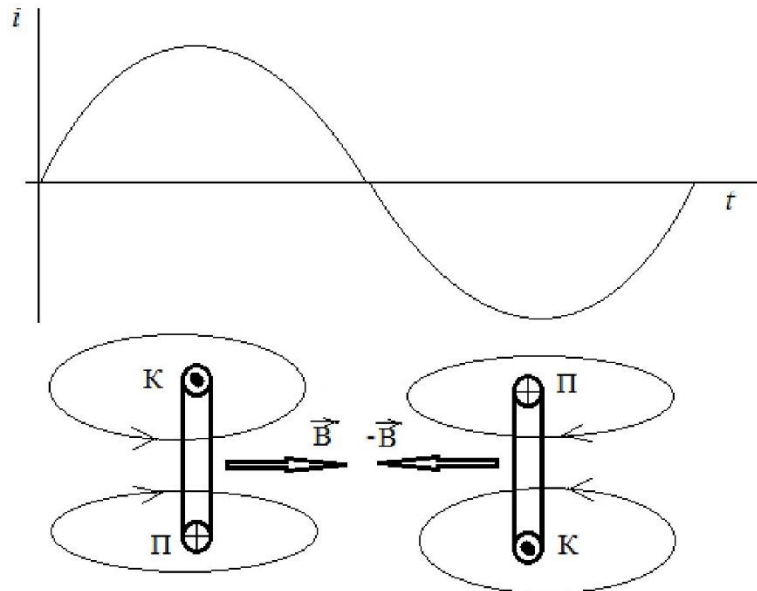


Рисунок 2 – До пояснення створення пульсуючого магнітного поля в рамці, і якій протікає змінний струм.

Застосовуючи правило буравчика визначаємо вектор магнітної індукції. З рисунка видно, що при зміні напрямку сили струму (графік) вектор магнітної індукції змінює свій напрям на протилежний. Тобто, змінюючи напрям струму в рамці, можна отримати змінне пульсуюче магнітне поле (рис. 3).

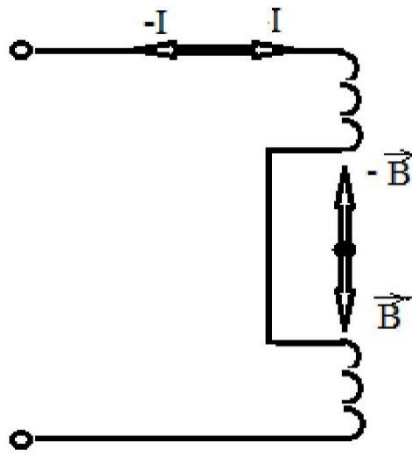


Рисунок 3 – Схематичне зображення процесу утворення обертового магнітного поля в котушці, в якій протікає однофазний змінний струм

Пояснити утворення обертового магнітного поля у двофазній системі можна за рис. 8.4. Розташуємо два соленоїди під кутом  $90^\circ$  один відносно одного. Пропустимо постійний струм, який збуджує магнітне поле навколо соленоїдів, напрям вектора індукції якого можна визначити за правилом буравчика. Напрямок струму через рівні проміжки часу змінюватимемо так, як це зображено на рисунку 8.4 (а, б, в, г).

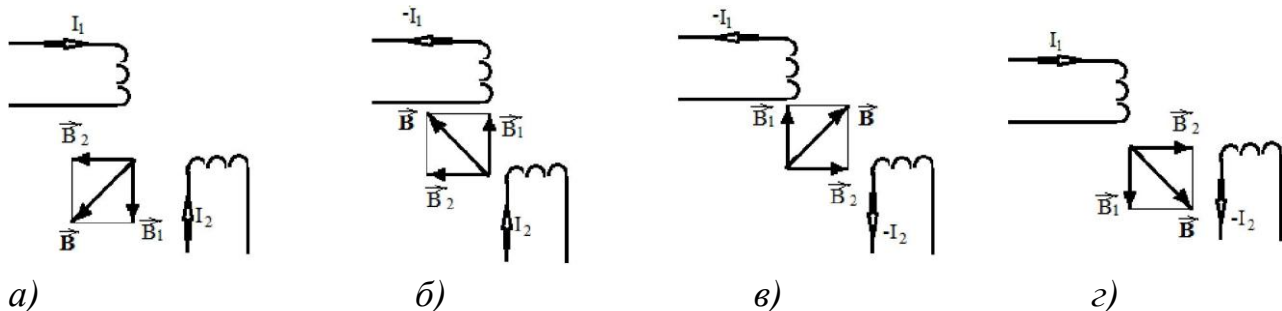


Рисунок 8.4 – Схематичне зображення процесу утворення обертового кола у двофазній системі.

З малюнка видно, що зміна напрямку струму призводить до зміни напрямків векторів магнітної індукції  $B_1$  та  $B_2$ , а отже і результуючого вектора магнітної індукції  $B$ . Тобто вектор індукції стрибкоподібно здійснив повний оберт навколо точки, що співпадає з центром на перетині осей соленоїдів.

Якщо в котушках протікає змінний «синусоїдний» струм, то вектори також будуть змінюватись за законами синуса та косинуса:

$$B_1 = B_m \sin \omega t; B_2 = B_m \cos \omega t.$$

Результуюче значення вектора магнітної індукції

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

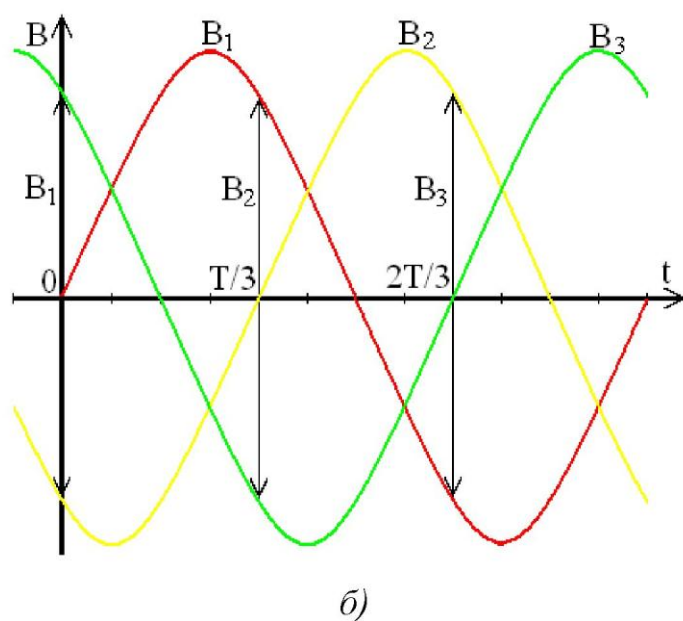
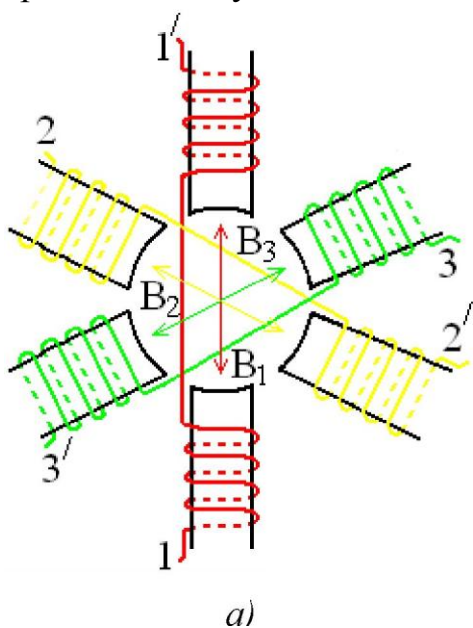
Отже у двофазній системі, із двох перпендикулярно розташованих

катушок, до яких підведена змінна напруга, рівномірно по колу обертатиметься магнітне поле, вектор магнітної індукції якого -  $B_m$ . Такого ж результату можна досягти, якщо початок однієї і кінець іншої катушок по різному комутувати, а джерело змінного струму взяти однофазне.

#### *Утворення обертового магнітного поля у трифазній системі*

Обертове магнітне поле можна отримати в системі трьох катушок, розташованих під кутом  $120^\circ$  одна відносно одної (рис. 5). Дійсно, якщо катушки приєднати до трьохфазного джерела струму, що змінюється за законом синусів, то в них створюються магнітні поля, вектори індукції яких змінюються за тими ж законами, що й струми. Тому в кожній із катушок обмотки статора по черзі з відставанням на одну третю періоду (або відставанням за фазою у  $120^\circ$ ), утворюватиметься магнітне поле. Очевидно вектор індукції магнітного поля буде повертатися відносно осі статора з частотою змінної напруги.

Так, для моментів часу  $t = 0; t = \frac{T}{3}; t = \frac{2}{3}T; t = T$  вектор магнітної індукції здійснюватиме поворот за годинниковою стрілкою, як це зображено на рисунку 8.5 в. Такий принцип покладено в основу принципу дії трифазного асинхронного двигуна.



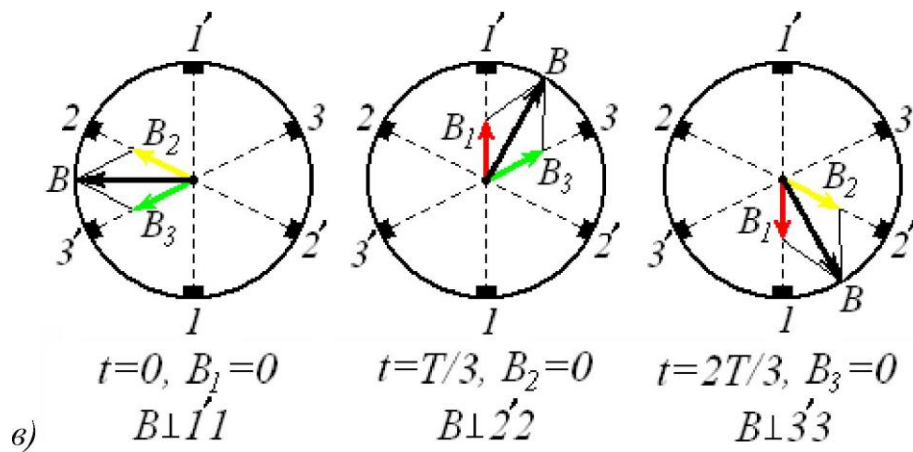


Рисунок 5 – Графічне зображення процесу створення обертового магнітного поля індукцією  $B$  у трифазній системі.

### 3. Будова асинхронних двигунів

Асинхронний електричний двигун є однією з найпростіших електричних машин. Він складається із статора, ротора, підшипникових щитів і клемного щитка.

Призначення статора - створювати обертове магнітне поле машини завдяки обмотці, яка живиться від трифазної мережі; ротора - перетворювати електричну енергію, за рахунок індуктування в ньому ЕРС, в механічну енергію обертового руху.

За конструкцією ротора двигуни поділяють на трьохфазні з коротко замкнутим ротором типу «біляче колесо» (рис. 6, а) та фазним ротором (рис. 6, б).

Фазний ротор асинхронного двигуна являє собою, закріплений на осі, циліндр набраний з пластин електротехнічної сталі, у якому є пази для розташування обмоток. Обмотки ротора (рис. 6, б) з'єднують зіркою, кінці яких приєднують до мідних кілець, за допомогою яких подають напругу від графітних щіток до обмоток. Такого типу ротори встановлюють у потужних двигунах для зменшення пускових струмів. У момент пуску пусковий реостат ПР вводять на максимальний опір, зменшуючи при цьому пусковий струм. Коли двигун виходить на номінальні оберти і потужність, то реостат виводять, замикаючи кінці обмоток «накоротко» і він працює як двигун з короткозамкнутим ротором.

Ротори з короткозамкнутою обмоткою (рис. 6, а). Обертовий момент можна збільшити, якщо замість однієї встановити на осі кілька рамок. В результаті утворюється конструкція, що складається з поздовжніх стрижнів і замикаючих їх по краях кілець, звана «біляче колесо»

У них обмоткою є алюмінієві стержні, залиті в пази сталюого циліндра, замкнуті на торцях суцільним кільцем. Така обмотка має назву - коротко

замкнена - типу «біляче колесо». Ротори з короткозамкненою обмоткою використовують у малопотужних двигунах.

Синхронні двигуни з фазним ротором використовуються в основному в регульованому приводі підйомно-транспортних механізмів, але останнім часом їх витісняють з цієї області двигуни з короткозамкненим ротором з живленням від перетворювачів частоти.

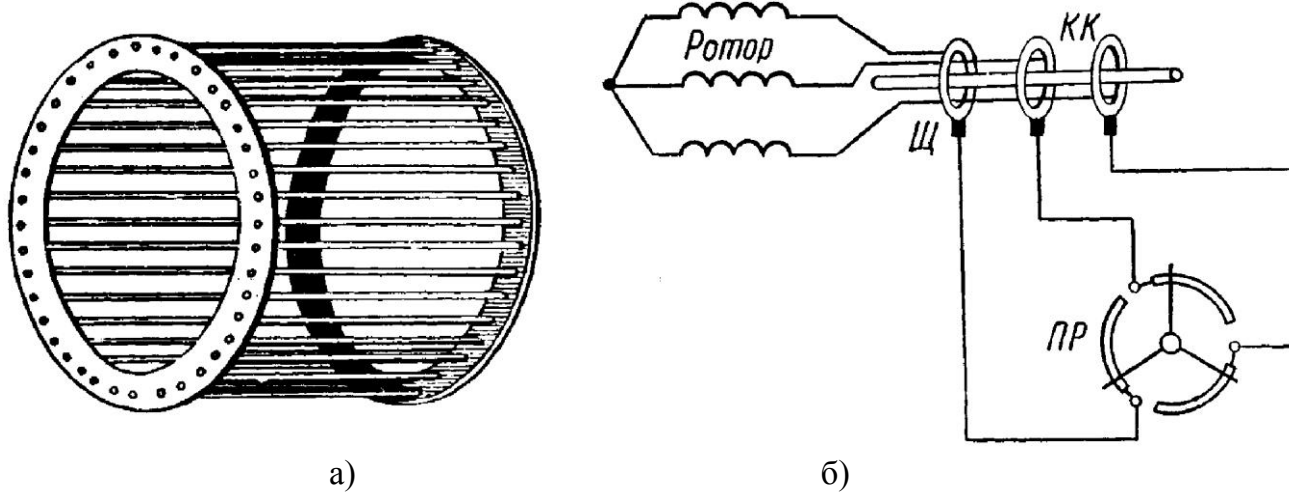


Рисунок 6 – Будова ротора асинхронного двигуна: а - «біляче колесо», б - фазний ротор з пусковим реостатом.

Статори всіх типів асинхронних двигунів майже однакові і складаються з таких деталей: корпусу; сталюого осердя з пазами для обмоток, що набирається із пластин електротехнічної сталі, ізолюваних між собою; обмотки, що вкладається в пази сталюого осердя.

Обмотки статора з'єднують «трикутником» або «зіркою» залежно від напруги в мережі, або в режимі пуску двигуна перемиканням з «зірки» на «трикутник».

Обмотки статора створюють обертове магнітне поле, яке перетинає обмотку ротора. У ній індукується ЕРС, протікає індукційний струм ротора за рахунок того, що обмотка ротора замкнена. На обмотку ротора, по якій протікає струм, з боку обертового магнітного поля діє сила ампера і змушує ротор обертатися.

#### 4. Синхронні машини

Синхронні машини можуть працювати в режимах генератора, двигуна та компенсатора. Найбільше розповсюдження вони отримали, як генератори трифазного струму (СГ).

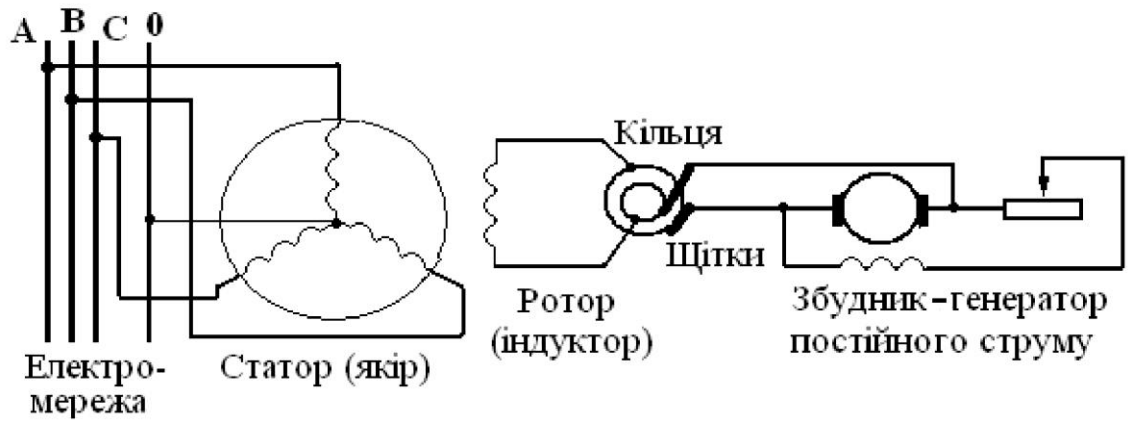


Рисунок 7 – Схема трифазного синхронного генератора змінного струму.

*Принцип дії синхронного генератора.* У синхронних генераторах якорем є статор, подібний до статора асинхронного двигуна, а індуктором - рухома частина машини ротор. В обмотках статора індукуються ЕРС у наслідок їх перетину обертовим магнітним полем ротора. Обмотка статора (якір) приєднана до електричної мережі (навантаження генератора) відповідної напруги та частоти, обмотка ротора (індуктор) живиться постійним струмом від окремого джерела або випрямленим струмом самого генератора і створює магнітний потік. На рис. 7 зображена його схема.

Ротор обертають приводом з постійною швидкістю. Якщо кількість пар полюсів статора та ротора однакова, то в режимі навантаження обмотками якоря (статора) протікає струм навантаження і при цьому утворюється обертове магнітне поле, частота обертання якого синхронна з частотою обертання (поля) ротора.

При обертанні ротора, його магнітний потік наводить в обмотках статора ЕРС:

$$e = -kN \frac{d\Phi}{dt}.$$

де  $k$  - коефіцієнт зв'язку між обмотками ротора і статора;  $N$  - кількість витків в обмотці статора;  $\frac{d\Phi}{dt}$  - швидкість зміни магнітного потоку відносно обмоток статора.

При рівномірному обертанні ротора з частотою  $n$  обертів за хвилину при  $p$  пар полюсів у ньому, магнітний потік змінюється відносно обмоток ротора періодично (за законом синусів) з частотою  $f = \frac{pn}{60}$ .

*Класифікація:* залежно від типу первинного двигуна (привода СГ), генератори бувають: турбогенератори; гідрогенератори; дизель-генератори; вітрові генератори.

*Основне застосування:* для виробництва електричної енергії у всіх промислових електричних станціях.

*Основні складові синхронних генераторів* - ротор, статор, збудник.

Ротор - рухома обертова частина машини. Він утворює обертове магнітне поле за рахунок струму збудника - джерела постійного струму через щітки і кільця.

Статор - чавунний корпус, в якому міститься осердя, з листів електротехнічної сталі, ізолюваних між собою. В пазах його розміщують трифазну обмотку.

Ротори бувають двох типів: з явно виявленими та з вмонтованими неявно вираженими полюсами.

*Ротори з явно виявленими полюсами*, в яких обмотка збудження у вигляді подушок нагадують полюси. Так роблять в тихохідних машинах з великою кількістю полюсів, наприклад в гідрогенераторах.

*Ротор з вмонтованими полюсами*, у якого обмотка збудження укладається в пази, що фрезерують у суцільному тілі вала. Це забезпечує механічний захист. Її використовують у швидкісних турбогенераторах. Кількість пар полюсів 1, рідше 2 (рис. 8).

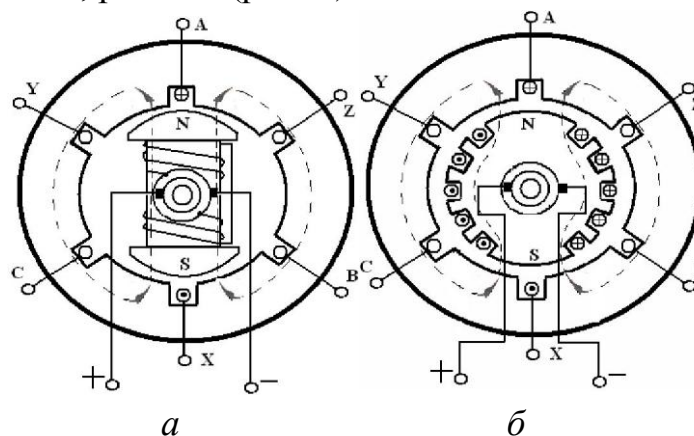


Рисунок 8 – Схеми синхронних машин: а - з явно вираженими полюсами; б - з вмонтованими полюсами ротора

*Збудник* - генератор постійного струму потужністю 0,25 - 1% від номінальної потужності генератора, розташований на валу синхронного генератора. Малопотужні генератори мають самозбудження - живляться струмом самого генератора, випрямленого через напівпровідникові випрямлячі.

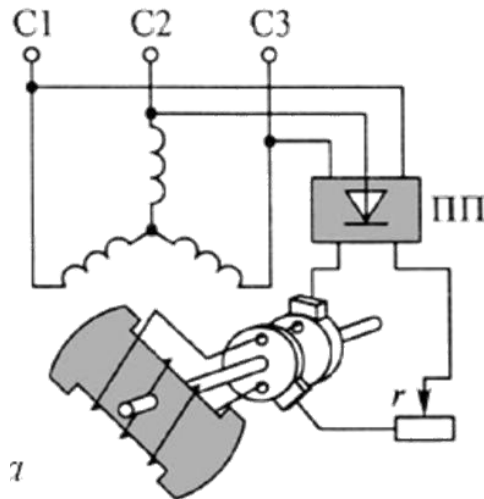


Рисунок 9 – Принцип самозбудження СГ

#### *Синхронні двигуни (СД)*

За будовою синхронний генератор аналогічний до синхронного двигуна. Статори ідентичні, різняться ротори.

За принципом дії вони відрізняються тим, що в СГ ведучою ланкою є ротор, вісь магнітного потоку якого випереджає вісь потоку статора на деякий кут, а в СД - навпаки - обертове магнітне поле статора веде за собою магнітне поле ротора і сам ротор.

Якщо підвести до ротора постійну напругу, а до обмоток статора трифазний змінний струм, то взаємодія магнітних полів і струмів виникне обертовий магнітний момент. Проте ротор залишається нерухомим, він отримає 100 поштовхів за секунду і лише вібруватиме.

Ротор зможе обертатися і може виконати механічну роботу, якщо його попередньо розкрутити до частоти обертового магнітного поля у статорі.

СД отримали застосування, як двигуни великої потужності (більше 100 кВт) при невеликих швидкостях: прокатні стани, насоси, холодильні машинки, вентилятори, тощо.