

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи
(частина 2)

Суми
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи (частина 2)

для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання

спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка».

Суми
2021

УДК – 5150-(075.8)
Р-99

Укладачі: Рясна О.В., старший викладач кафедри електротехнічних систем СНАУ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ / Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи (частина 2) для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання, спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» /Суми, 2021 рік, 65 ст., рис. 41, табл. 1, бібл. 10

В методичних вказівках (частина 2) наведені всі теми для вивчення дисципліни.

Методичні вказівки (частина 2) призначені для студентів 3 (2 с.т.) курсу денної і заочної форм навчання, спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Рецензенти: Герасименко В.О., к.ф-м.н., доцент, завідувач кафедрою вищої математики СНАУ;

Кравченко В.О., к. ф-м. н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем

Відповідальний за випуск: Чепіжний А.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри енергетики та електротехнічних систем СНАУ

Рекомендовано до видання навчально-методичною радою інженерно-технологічного факультету. Протокол № 6 від « 24 » травня 2021 року

Тематичний план

№ п/п	Назва розділу, теми	Кількість годин	
		Денна форма	Заочна форма
1	СРС	16	68

ЗМІСТ

Вступ	3
1 Матеріал для самостійної роботи	6
1.10 Тема: Призначення та види машин постійного струму	6
1.11Тема: Принцип дії узагальненої машини постійного струму.....	12
1.12 Тема: Призначення та види генераторів постійного струму (ГПС).....	15
1.13 Тема: Режим холостого ходу та навантаження ГПС.....	19
1.14Тема: ГПС незалежного збудження: електрична схема, характеристики та властивості.....	24
1.15 Тема: Призначення та види двигунів постійного струму (ДПС). Тема Принцип дії та основні рівняння ДПС.....	30
1.16 Тема: Методика розрахункового визначення енергетичних показників ДПС за паспортними даними.....	41
1.17 Тема: Способи пуску і регулювання частоти обертання ДПС. Тема: Регулювання частоти обертання ДПС незалежного збудження.....	50
1.18 Тема: Поняття і оцінка комутації МПС Список рекомендованої літератури	63

ВСТУП

1. Дисципліна «Електричні машини» є однією з основних профільюючих дисциплін у системі підготовки інженера - енергетика.

Метою вивчення дисципліни «Електричні машини» є надання майбутнім магістрам досить глибоких знань і уявлень в галузі електричних машин, електромеханічного перетворення енергії та управління процесами такого перетворення, що повинно стати основою для практичної діяльності в галузі експлуатації електричних машин.

Предметом вивчення дисципліни є: основні фізичні закони, на яких базується принцип дії і процеси перетворення енергії набуття та свідоме застосування знань з електричних машин; взаємозалежності електричних і техніко-економічних характеристик електричних машин; будова та принцип дії електричних машин; загальні принципи їх будови; схеми, характеристики, способи пуску та властивості двигунів постійного та змінного струму; питання запуску та гальмування двигунів та їх вибір. Приділяється увага також вивченню електричних машин в АПК; орієнтувати студентів на оволодіння теорією електричних машин та практичним навичкам вирішення виробничих питань.

Дисципліна базується на знаннях з вищої математики, фізики, загальної електротехніки, промислової електроніки, теоретичної механіки. Оволодіння студентами навчальної дисципліни «Електричні машини» дозволяє успішно засвоїти такі спеціальні дисципліни, як «Монтаж електрообладнання і систем керування», «Електротехнології в АПК», «Енергетичні установки», «Проектування систем електрифікації, автоматизації і електропостачання». «Електротехнології та електроосвітлення» та застосовувати знання при розв'язанні практичних виробничих завдань.

В сучасних електричних установках раціональне використання електричної енергії часто буває зв'язане не тільки з її перетворенням в механічну енергію, але й з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в другий, наприклад змінного струму низької напруги в струм високої напруги, змінного струму – в постійний, трифазного – в двофазний та ін. Такі перетворювання виконуються при допомозі електричних машин, що називаються **перетворювачами електричного струму** або **електромашинними перетворювачами**.

Особливо широке використання в сучасній техніці одержали перетворювачі змінного струму однієї напруги в змінний струм другої напруги тієї ж частоти, що називаються *трансформаторами*.

Електромеханічне перетворення енергії супроводжується обов'язковим перетворенням електричної або механічної енергії в теплову. Перетворення

енергії в тепло в електричних машинах прийнято називати втратами, так як теплова енергія при експлуатації електричних машин, як правило, не використовується в практичних цілях. В електричних машинах великої потужності в тепло перетворюється одиниці або навіть долі відсотків енергії, що підводиться до електричних виводів або валу машини. В машинах малої потужності в тепло може перетворюватись велика частина енергії, що підводиться до машини, тому ККД машини малої потужності невеликий.

Електрична машина – електромеханічний пристрій, який здійснює взаємне перетворення механічної і електричної енергії. Електрична енергія виробляється на електростанціях електричними машинами – генераторами, які перетворюють механічну енергію в електричну. Основна частина енергії (до 80%) виробляється на електростанціях, де при спалюванні хімічного палива (вугілля, торф, газ) нагрівається вода і переводиться в пару високого тиску. Пара подається в турбіну, де розширяється і приводить ротор турбіни до обертання (теплова енергія в турбіні перетворюється в механічну). Обертання ротора турбіни передається на вал генератора (турбогенератора). В наслідок електромагнітних процесів, які проходять в генераторі, механічна енергія перетворюється в електричну.

Процес виробництва електроенергії на атомних електростанціях аналогічний тепловим з різницею, що замість хімічного палива використовується ядерне.

Процес вироблення електроенергії на гідроелектростанціях полягає в наступному: вода, піднята дамбою на певний рівень, скидається на робоче колесо гідротурбіни, отримана при цьому механічна енергія шляхом обертання колеса турбіни передається на вал електричного генератора, в якому механічна енергія перетворюється в електричну.

В процесі споживання електричної енергії здійснюється її перетворення в інші види енергій (теплову, механічну, хімічну). Біля 70% електроенергії використовують для приведення в дію верстатів, машин та механізмів, тобто для перетворення її в механічну енергію. Це перетворення здійснюється електричними машинами – *електродвигунами*.

Останнім часом значно зросло застосування електричних машин малої потужності – мікромашин потужністю від долей до декілька сотен ватт. Такі електричні машини застосовують в пристроях автоматики та обчислювальної техніки.

Особливий клас електричних машин складають двигуни для побутових електричних пристроїв – пирососів, холодильників, вентиляторів. Потужність цих двигунів незначна, конструкція проста і надійна.

Галузь науки і техніки, яка займається розвитком і виробництвом електричних машин називається електромашинобудуванням. Теоретичні основи електромашинобудування були закладені у 1821 р. М.Фарадеєм, який встановив можливість перетворення електричної енергії в механічну (здійснив обертання магніту навколо прямого провідника з струмом) і створив першу модель електродвигуна. Важливу роль у розвитку електромашинобудування мали

роботи вчених Д. Максвелла та Е.Х. Ленца. Основні етапи розвитку електромашинобудування:

- 1832 р. – перша модель генератора постійного струму, створена братами Піксі (США)

- 1838 р. – Борис Семенович Якобі створив електродвигун постійного струму обертального руху. Цей двигун був встановлений на катер, який виконав випробувальний рейс по Неві.

- 1889 р. Михайло Йосипович Доливо-Добровольський розробив систему трифазного струму та 3-фазний АД.

Електричні машини застосовують також в якості електромашинних перетворювачів та електромашинних підсилювачів (але зараз рідко).

В пристроях автоматики та обчислювальної техніки електричні машини застосовують не лише в якості двигунів, але і в якості тахогенераторів (для перетворення частоти обертання в електричний сигнал), сельсинів.

I. МАТЕРІАЛ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1.10 ТЕМА ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ВИДИ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

План

1. Призначення та види машин постійного струму.
2. Будова машин постійного струму загального призначення.

Мета: ознайомити студентів з призначенням та структурою дисципліни; основними поняттями про електричні машини (призначення, види та будова МПС).

1. Призначення та види машин постійного струму.

Електрична машина — електромеханічний пристрій для перетворення механічної енергії на електричну чи електричної на механічну, або електричної енергії одного роду чи з одними параметрами на електричну енергію іншого роду або з іншими параметрами.



Рис. 1 Двигун трифазний асинхронний



Рис. 2 Електрогенератори



Рис. 3 Силовий трансформатор

в гідроенергетиці

Класифікація Електричні машини класифікують за різними ознаками, серед яких найпоширеніші такі:

За видом енергії поля Енергія перетворюється в полі між нерухомою (статор) і рухомою (ротор) частинами електричної машини. Розрізняють індуктивні, ємнісні та індуктивно-ємнісні машини. У перших використовують магнітне поле, у других - електричне, у третіх - обидва види.

За родом струму Електричні машини поділяють на машини *постійного* та *змінного струму*. Останні, як правило, мають кращі масо габаритні показники, вищу надійність, більш технологічні та дешевші, але їх регулювання складніше. Електричні машини змінного струму поділяють на синхронні, асинхронні і колекторні. Ротор синхронних електричних машин обертається з тією самою швидкістю, що й магнітне поле машини. Частота обертання ротора асинхронних машин відрізняється від частоти поля. У колекторних машинах поле пульсує і зазвичай непорушне, тому їх іноді відносять до асинхронних.

За перетворенням енергії (призначенням) Електрична машина, що перетворює механічну енергію на електричну, називають генератором, електричну на механічну - двигуном, а електричну енергію одних параметрів на електричну інших параметрів — трансформатором. Крім того, є безліч електричних спеціального призначення: компенсатори — синхронні електричні машини для генерування реактивної потужності, фазо- та індукційні регулятори — асинхронні машини для регулювання фази й амплітуди змінної напруги, перетворювачі частоти тощо.

За потужністю За потужністю машини умовно поділяються на:

- дуже малої потужності (мікромашини) — до 0,5 кВт;
- малої потужності — 0,5-10 кВт;
- середньої потужності — 10-200 кВт;
- великої потужності — понад 200 кВт;
- машини граничних потужностей — сотні тисяч кіловат і більше.

За значенням напруги Низьковольтні електричні машини — значення робочої напруги не перевищує 1 кВ. Випробувана напруга, наприклад, ізоляції на пробій може перевищувати 1 кВ. Високовольтні машини мають робочу напругу, принаймні однієї обмотки, понад 1000 В.

За видом руху та кількістю координат Більшість електричних машин (крім трансформаторів) виконують один вид руху — обертальний, за однією координатою, тобто є *одновимірними*. Машини, призначені для поступального переміщення ротора називаються *лінійними*. Як обертові так і лінійні електричні машини можуть мати число координат більше за одиницю — теоретично до шести при сполученні обертального та поступального рухів. З

багатовимірних електричних машин знаходить застосування **двовимірні**, що, зокрема, поєднують обертальний рух з поступальним.

За числом фаз Розрізняють одно-, дво-, три-, і багатofазні електричні машини. Практично число фаз не перевищує шести і лише в деяких випадках сягає дванадцяти. Машини постійного струму зазвичай належать до однофазних машин.

Крім зазначених класифікацій розрізняють й інші — за ступенем захисту від навколишнього середовища, за способом монтажу тощо.

1.1 Матеріали в електричних машинах Матеріали в електричних машин поділяють на три групи:

Конструкційні Конструкційні матеріали застосовують для виготовлення деталей машини, переважним призначенням яких є сприйняття і передача механічних навантажень, а також забезпечення необхідного ступеня захисту, охолодження, зміни мастила та ін. (станіни, підшипникові щити, вали, жалюзі, ущільнювачі, вентилятори та ін.). В якості конструкційних матеріалів використовують сталь, чавун, кольорові метали та їх сплави, пластмаси.

Активні Активні матеріали служать для протікання в машині електромагнітних процесів. Ці матеріали поділяють на магнітні та провідникові

Ізоляційні Однією з найважливіших властивостей ізоляційних матеріалів являється нагрівостійкість - здатність матеріалу зберігати свої ізоляційні і механічні властивості при дії робочих температур протягом часу, визначуваного терміном служби електричної машини. Як відзначалося, усі ізоляційні матеріали розділені на 12 класів нагрівостійкості. Проте в сучасних електричних машинах застосовують ізоляційні матеріали лише трьох класів В, Р і Н, які володіють більш високою нагрівостійкістю.

2. Будова машин постійного струму загального призначення.

Як і будь-яка електрична машина, машина постійного струму складається з двох частин: статора і ротора. На її статорі розташований індуктор, а на роторі – якір.

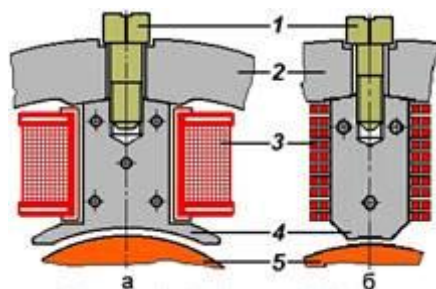


Рис. 1.4 Головний (а) та додатковий (б) полюси

Статор – індуктор, призначений в машині постійного струму для створення магнітного поля, найчастіше електромагнітним шляхом, тобто, *обмоткою збудження 3* (іноді в машинах малої та середньої потужності магнітне поле створюється постійними магнітами). Ця обмотка виконується у вигляді котушки (на каркасі або без нього) з мідного ізолюваного дроту і насаджується на *основний (головний) полюс* (рис. 1.4, а). З боку ротора *5* полюс має *полюсний наконечник 4* (він ще називається полюсний *башмак*), яким забезпечується більш рівномірний розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку. В пазах башмаків машин середньої та великої потужності може виконуватися *компенсаційна обмотка* із мідного дроту. Число основних полюсів в машині – $2p$ (p – число пар полюсів машини). Основні полюси з технологічних міркувань виконуються із листової холоднокатаної конструкційної сталі товщиною ($1 - 1,5$) мм і мають вигляд, зображений на (рис. 1.4, а). Із пластин набирається пакет полюса, який, в свою чергу, кріпиться до *ярма 2* за допомогою болтів *1*. Ярмо служить для замикання магнітного потоку між полюсами. Воно відливається із чавуна або відрізається із товстостінної сталевих труби. До ярма *2* також болтами *1* кріпляться *додаткові полюси* (рис. 1.4, б). Вони виконуються так, як і основні полюси, із пластин *4* і мають *обмотку додаткових полюсів 3*, яка виготовляється із мідного дроту значного перетину, тому що вмикається послідовно з обмоткою якоря. В мікромашинах і машинах малої потужності число додаткових полюсів може бути в два рази менше, ніж основних. Зовні до ярма кріпиться *клемна коробка*, в яку виводяться *відводи* обмоток, що позначаються таким чином: *Я1, Я2* – обмотка якоря; *Ш1, Ш2* – обмотка збудження паралельна; *С1, С2* – обмотка збудження послідовна; *Д1, Д2* – обмотка додаткових полюсів; *К1, К2* – компенсаційна обмотка. Слід мати на увазі, що не всі із перерахованих обмоток є в кожній машині, так компенсаційна обмотка, як зазначалось вище,

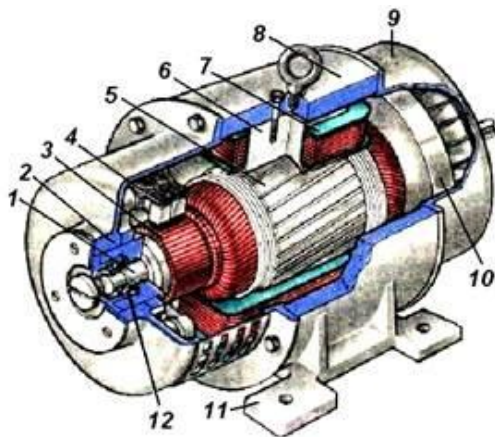


Рис. 1.5 Побудова машини

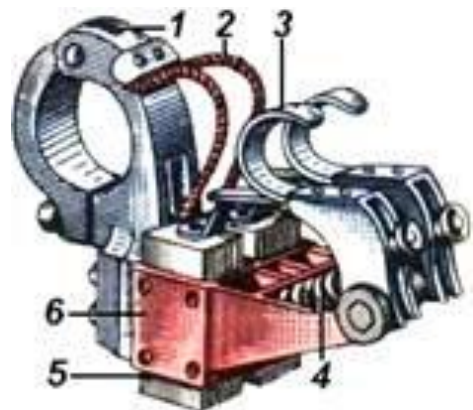


Рис. 1.6 Щіткотримач зі щітками

постійного струму

виконується лише в машинах середньої та великої потужності, обмотка послідовного збудження відсутня у машині паралельного збудження і навпаки тощо.

Загальна конструкція машини постійного струму подана на (рис. 1.5). Ярмо **8** разом з полюсами **6**, на яких розміщена обмотка збудження **7**, лапами **11** та клемною коробкою, називаються *станиною*. З боків до станини кріпляться *підшипникові щити* **2** та **9** з *підшипниками* **12**. Вони призначені для центрування ротора **5** відносно статора і створення рівномірного повітряного проміжку між полюсами та ротором (у деяких машин, що не мають додаткових полюсів, величина повітряного проміжку по осі полюса може бути меншою ніж на краю). На одному з підшипникових щитів, він називається *переднім*, розміщується *щітковий апарат* **4**. Щітковий апарат складається з *траверси*, *щіткових пальців*, *щіткотримачів* та *щіток*. Траверса, кільцева або променева, дозволяє зміщувати щітки на деякий кут відносно основного їх положення по осі між полюсами. Щіткові пальці призначені для ізолювання щіток між собою та від станини; вони виконуються із гетинаксу чи текстоліту прямокутного або круглого перерізу. Щіткотримачі (рис. 1.6) складаються із *щіткового гнізда* **6**, *пружини* **4** та *притискувача* **3**. Щіткотримач забезпечує положення щітки **5**, на осі машини і створює необхідний тиск на колектор. Щітка виконується із мідно-графітової суміші (використовуються графітні, вугільно-графітні, електро графітові та мідно-графітні щітки), в яку впресований мідний тросик **2** для з'єднання з колом якоря. Хомутом **1** щіткотримач кріпиться на щітковому пальці. Передній підшипниковий щит має оглядове вікно (люк), через яке можна оглянути колектор та щітки не розбираючи машину.

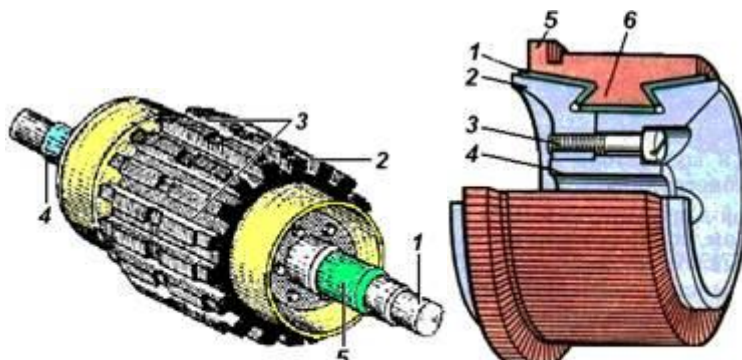


Рисунок 1.7 – Необмотаний ротор машини постійного струму

Рисунок 1.8 – Побудова колектора

Ротор – якір, де створюється ЕРС. Ротор (рис. 1.7) складається з *вала* **1**, *пакета заліза* **2**, в *пази* **3** якого укладена обмотка якоря, колектора та *вентилятора*. Вал машини виготовляється з

високоякісної легованої сталі, що забезпечує передачу механічного моменту. На валу є місце **5** із шпонковим прорізом, на яке закріплюється колектор, та місце **4** для установлення вентилятора. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів ізотропної електротехнічної сталі товщиною (0,35 – 0,5) мм, що ізолюються один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. В пази пакета заліза вкладається з'єднана з колектором обмотка якоря з ізольованого мідного дроту. Колектори в машинах постійного струму виконуються двох видів: з *колекторними пластинами* запресованими в *пластмасі* та з колекторними пластинами стягнутими *конусними гайками*.

В останньому (рис. 1.8) колекторні пластини ізолюються між собою та елементами стягування *міканітовими прокладками 1*, а стягуються з'єднанням типу *ластівчин хвіст 6* за допомогою болта **3** і спеціальних конусних гайок **2** та *шайб 4*. Півник **5** служить для електричного і механічного з'єднання пластини з обмоткою. Щітка притискується до робочої поверхні колекторної пластини. На валу машини, з боку, протилежного колектору, як правило, для покращання охолодження насаджується вентилятор **10** (рис. 1.5).

Із розглянутого принципу дії та конструкції машини постійного струму витікає, що обов'язковим елементом цієї машини є колектор, який вмикається між обмоткою якоря та зовнішнім колом. Наявність колектора суттєво ускладнює конструкцію, погіршує експлуатаційні властивості та значно підвищує вартість машини постійного струму.

Це необхідно запам'ятати:

- при обертанні обмотки якоря генератора в магнітному полі, в її провідниках створюється змінна ЕРС, яка колектором і щітками випрямляється в постійну;
- на провідники зі струмом обмотки якоря двигуна в магнітному полі діють електромагнітні сили, створюючи обертовий момент, напрям якого лишається незмінним завдяки колектору та щіткам, що перетворюють постійний струм джерела у змінний;
- основні деталі статора: ярмо, головні полюси з обмотками збудження (або постійні магніти), додаткові полюси зі своїми обмотками, підшипникові щити та щітковий апарат;
- ротор складається з вала, на ньому пакет заліза, в пази якого укладена обмотка якоря, сполучена механічно та електрично з колектором;

Контрольні питання

1. Наведіть призначення машин постійного струму. Переваги і недоліки основних серій машин постійного струму.
2. З яких основних елементів складаються основні і додаткові полюси машини постійного струму? Призначення основних і додаткових полюсів.
3. З яких основних елементів складається якорь машини постійного струму? Призначення якоря машини та особливості будови.
4. З яких основних елементів складається колектор машини постійного струму? Призначення та особливості будови колекторів.
5. З яких основних елементів складається щітковий апарат машини постійного струму? Призначення та особливості будови окремих елементів щіткового апарату.

1.11 ТЕМА ПРИНЦИП ДІЇ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.

План

1. Принцип дії узагальненої машини постійного струму.
2. Принцип оборотності.

Мета: Засвоєння принципу дії узагальненої машини постійного струму і особливостей роботи в різних режимах

1. Принцип дії узагальненої машини постійного струму.

Електричний генератор - це електрична машина, що перетворює механічну енергію обертання в електричну енергію постійного або змінного струму. Генератори можуть бути двох типів: синхронні і асинхронні. Синхронні генератори складають основу електричного обладнання електростанцій, тобто практично вся електроенергія виробляється синхронними генераторами. Пристрій і принцип дії синхронного генератора полягає в наступному (рис.1).

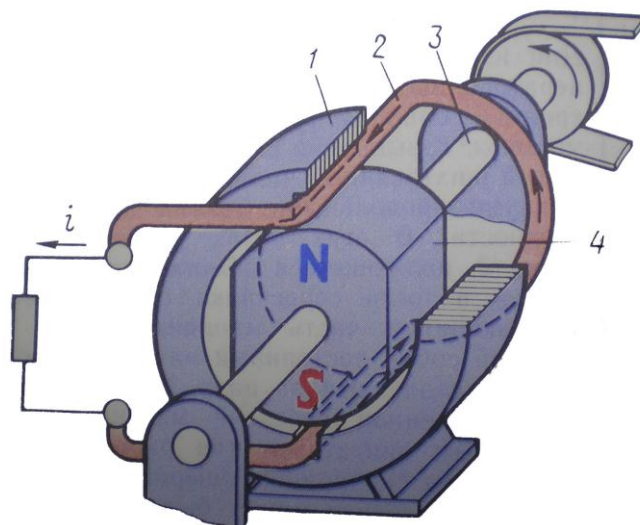


Рис. 1. Спрощена модель синхронного генератора

Нерухома частина машини, звана статором, являє собою порожнистий шихтований циліндр 1 (сердечник статора) з двома поздовжніми пазами на внутрішній поверхні. У цих пазах розташовані збоку витки 2, що є обмоткою статора. У внутрішній порожнині сердечника статора розташована обертається частина машини - ротор, що представляє собою постійний магніт 4 з полюсами N і S, закріплений на валу 3. Вал ротора за допомогою пасової передачі механічно пов'язаний з приводним двигуном (на малюнку не показаний). У реальному синхронному генераторі в якості приводного двигуна може бути використаний двигун внутрішнього згоряння або турбіна. Під дією обертального моменту приводного двигуна ротор генератора обертається з частотою n_1 проти годинникової стрілки. При цьому в обмотці статора відповідно з явищем електромагнітної індукції наводиться ЕРС, напрямок якої показано на малюнку стрілками. Так як обмотка статора замкнута на навантаження Z , то в ланцюзі цієї обмотки з'явиться струм i . У процесі обертання ротора магнітне поле постійного магніту також обертається з частотою n_1 , а тому кожен з провідників обмотки статора поперемінно виявляється то в зоні північного (N) магнітного полюса, то й зоні південного (S) магнітного полюса. При цьому кожна зміна полюсів супроводжується зміною напрямку ЕРС в обмотці статора. Таким чином, в обмотці статора синхронного генератора наводиться змінна ЕРС, а тому струм i в цій обмотці і в навантаженні Z також змінний.

Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рисунок 2). Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1, що створюють основний магнітний потік Φ , і ярма (станини), не наведеного на рисунку 2.

Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталевго осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізолюваних одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами.

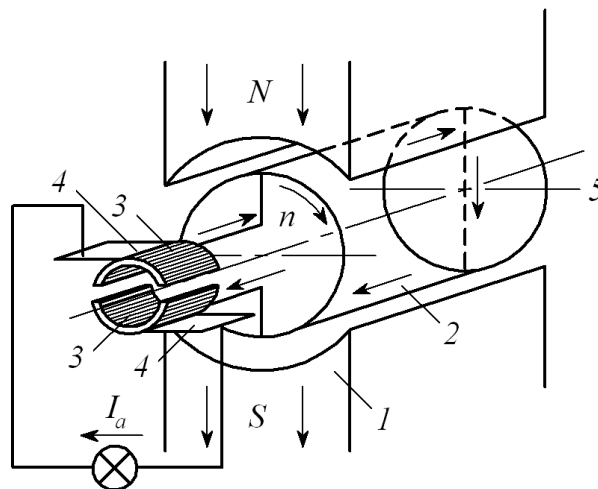


Рисунок 2 – Модель машини постійного струму

Магнітний потік Φ виходить з північного полюса N , пронизує якір, входить у південний полюс S і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса N . *Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами, до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.*

Режим генератора. Якір машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. В провідниках обмотки якоря індукується електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полюсів Φ вважається постійним, то індукована ЕРС створюється виключно внаслідок обертання якоря і називається *ЕРС обертання*.

Величина ЕРС обертання, що індуктується в провіднику обмотки якоря

$$e_{np} = B \cdot l \cdot v, \quad (1)$$

де B - величина магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом і

якорем в місці розташування провідника;

l - активна довжина провідника, тобто довжина, на протязі

якої провідник розташований у магнітному полі;

U - лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індуктуються однакові e_{np} , які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини

$$E_a = 2e_{np} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v. \quad (2)$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять почергово

під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику

змінюється. За формою крива ЕРС провідника повторює криву розподілення індукції B в повітряному проміжку (рисунок 3,а). Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a . В обмотці якоря струм буде змінним і його крива буде аналогічною кривій ЕРС (рисунок 3, а). Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором (рисунок 1) і зміні напрямку ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок чого, під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним

полюсом. В результаті чого, полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними.

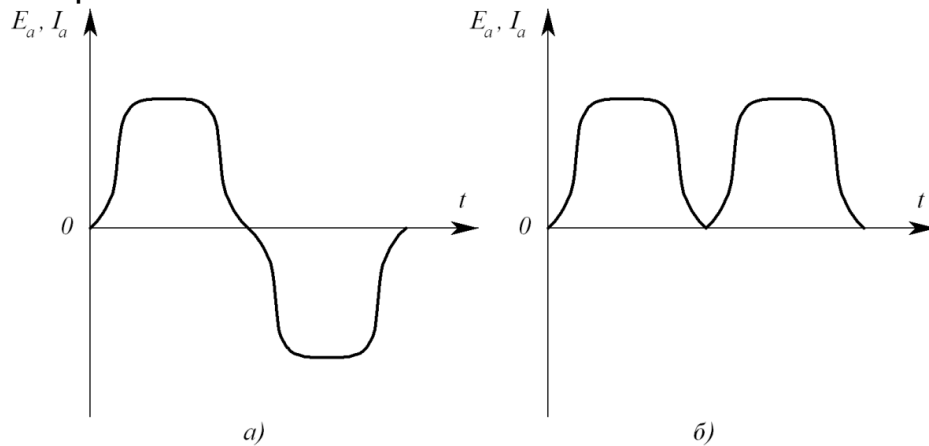


Рисунок 3 – Форма кривої ЕРС і струму в якорі (а) і зовнішній мережі (б)

моделі машини постійного струму

Таким чином, в генераторі колектор виконує функцію механічного випрямляча, який перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішній мережі. Змінивши знак напівперіода кривої ЕРС і струму I_a (рисунок 3, а), отримаємо форму кривої ЕРС і струму I_a в зовнішній мережі (рисунок 3, б). Напруга постійного струму на затискачах генератора визначається E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря r_a

$$U_a = E_a - I_a \cdot r_a. \quad (3)$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили (рисунок 3, а)

$$F_{np} = B \cdot l \cdot I_a, \quad (4)$$

напрямок яких визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють механічний обертовий момент M_{em} , який називається електромагнітним моментом,

де D_a - діаметр якоря, мм.

В режимі генератора M_{em} діє в протилежному обертанню якоря напрямку і є гальмівним.

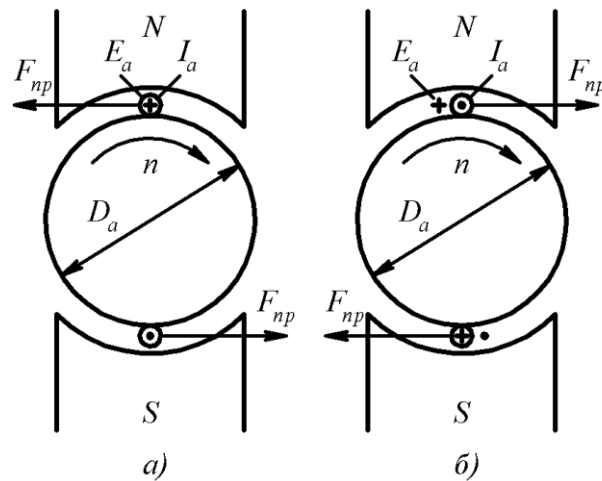


Рисунок 4 – Робота моделі машини постійного струму в режимі генератора (а) і двигуна (б)

$$M_{em} = F_{np} \cdot D_a, \quad (5)$$

Режим двигуна. До обмотки якоря підводиться постійна напруга U_a від зовнішнього джерела живлення, по обмотці якоря протікає струм I_a . При цьому на провідники обмотки якоря діють електромагнітні сили F_{np} і створюється електромагнітний момент M_{em} (рисунок 4, б). Значення величин F_{np} і M_{em} визначаються рівняннями (4) і (5). При достатньому значенні M_{em} , якір машини буде обертатися і розвивати механічну потужність. Момент M_{em} при цьому є обертовим і діє в напрямку обертання якоря. В режимі двигуна колектор перетворює постійний струм, що споживається з зовнішньої мережі, в змінний струм, що протікає в обмотці якоря, і виконує функції механічного інвертора струму. Провідники обмотки якоря в режимі двигуна обертаються в магнітному полі, в них індукується E_a , величина якої визначається виразом (2). При збереженні напрямку обертання якоря, напрямки напруги U_a і струму I_a в обмотці якоря при зміні режиму змінилися на протилежний (рисунок 4, б). Таким чином, E_a в двигуні постійного струму направлена зустрічно прикладеній напрузі U_a і струму I_a в обмотці якоря, тому E_a в якорі двигуна постійного струму називається *противоЕРС*. Напруга, прикладена до затискачів якоря двигуна постійного струму, врівноважується E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря

$$U_a = E_a + I_a \cdot r_a. \quad (6)$$

Аналізуючи рівняння (3) і (6), можна зробити висновок, що в режимі генератора $U_a \leq E_a$, а в режимі двигуна $U_a \geq E_a$.

2. Принцип оберненості

Ґрунтуючись на розглянутому принципі дії машини постійного струму, можна зробити висновок, що будь-яка машина постійного струму може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Така якість притаманна всім типам обертових електричних машин і називається *зворотністю*. Можливість зміни режиму роботи машини постійного струму пояснюється можливістю зміни напрямків моментів, ЕРС та струмів в окремих елементах (рисунок 4). Таким чином, для зміни режиму роботи машини постійного струму при постійній полярності полюсів і щіток і при незмінному напрямі обертання

необхідно змінити напрям струму в обмотці якоря.

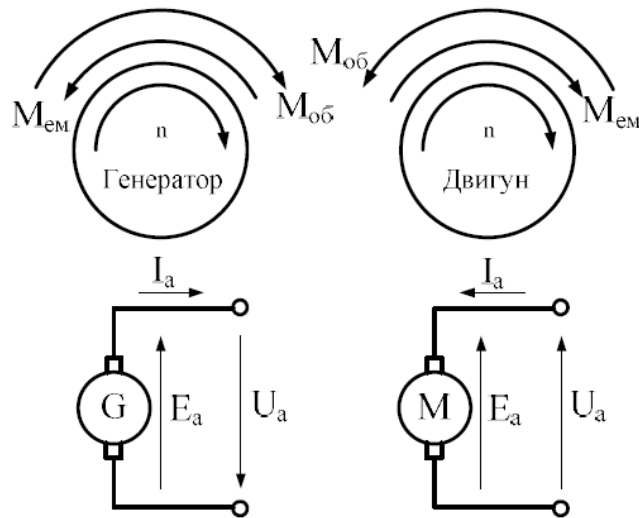


Рисунок 4 - Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі і двигуні постійного струму

Контрольні питання:

1. З яких основних функціональних частин складається узагальнена машина постійного струму?
2. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі генератора.
3. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі двигуна.
4. Яку функцію виконує колектор в машині постійного струму при роботі в різних режимах роботи?
5. Сформулюйте принцип оберненості машини постійного струму.

1.12 ТЕМА ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ВИДИ ГЕНЕРАТОРІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ГПС)

План

1. Призначення та види генераторів постійного струму (ГПС).
2. Принцип дії та основні рівняння ГПС.

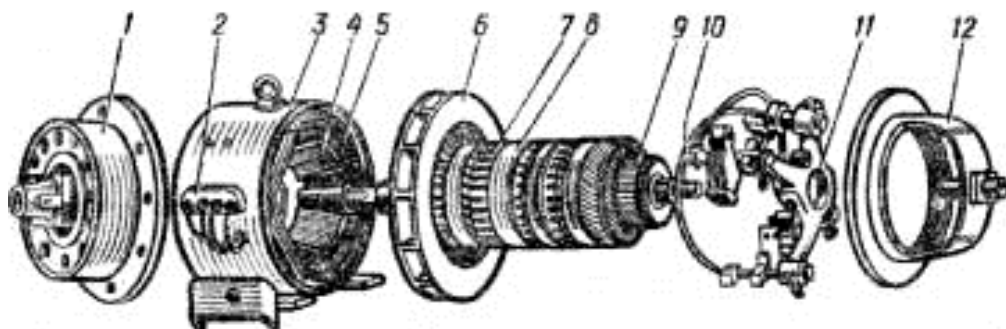
Мета: Засвоєння призначення та видів, принципу дії та рівнянь, що визначають основні властивості і закономірності, особливостей режимів роботи генераторів постійного струму.

1. Призначення та види генераторів постійного струму (ГПС).

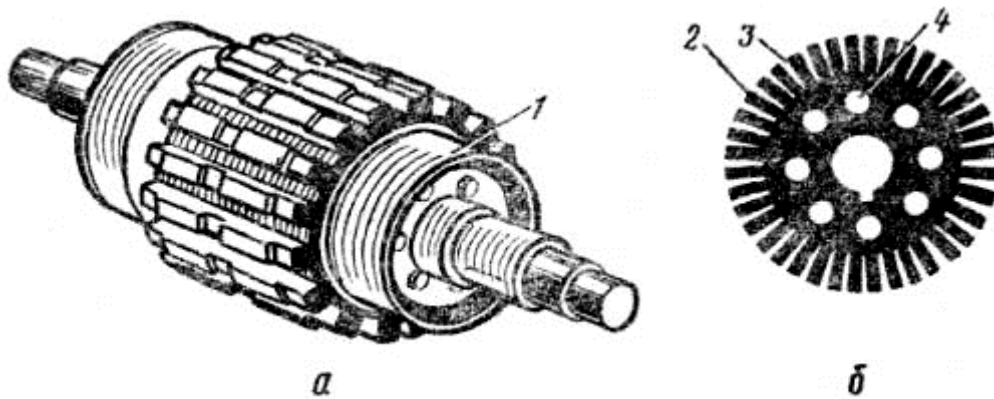
Генератор постійного струму — електрична машина постійного струму (генератор), що перетворює механічну енергію на електричну. Дія генератора постійного струму ґрунтується на явищі електромагнітної індукції: збудженні змінної електрорушійної сили в обмотці ротора (якоря), при його обертанні в основному магнітному полі, створюваному обмоткою збудження на полюсах. Обмотка ротора з'єднана з колектором (механічним перетворювачем змінної ерс на постійну напругу), по пластинах якого ковзають контактні щітки, підключаючи обмотку до зовнішнього електричного кола. Розрізняють генератори постійного струму з незалежним збудженням (від стороннього джерела струму) і з залежним збудженням (самозбудженням), зумовленим залишковим магнетизмом у станині й полюсах. Потужність генераторів постійного струму — від кількох ват до десятків тисяч кіловат, напруга — від одиниць до сотень і тисяч вольт. ККД їх при повному навантаженні — від 0,7 (малопотужні генератори) до 0,96 — генератори великої потужності. Генератори постійного струму застосовують для живлення постійного струму електродвигунів, у зварювальних пристроях, електричних установках літаків, тепловозів, автомобілів, у пристроях автоматики (мікрогенератори постійного струму), для електролізу тощо.

Одна й та сама машина постійного струму в принципі **може працювати і як генератор, і як двигун**. (Ця властивість машини постійного струму, що називається оборотністю, дає змогу не розглядати окремо будову генератора чи двигуна.)

Будова машини постійного струму:



1 — задній підшипниковий щит; 2 — затискачі; 3 — станина; 4 — головний полюс; 5 — обмотка головного полюса; 6 — вентилятор; 7 — обмотка якоря; 8 — осердя якоря; 9 — колектор; 10 — вал; 11 — траверса із щитковим механізмом; 12 — передній підшипниковий щит



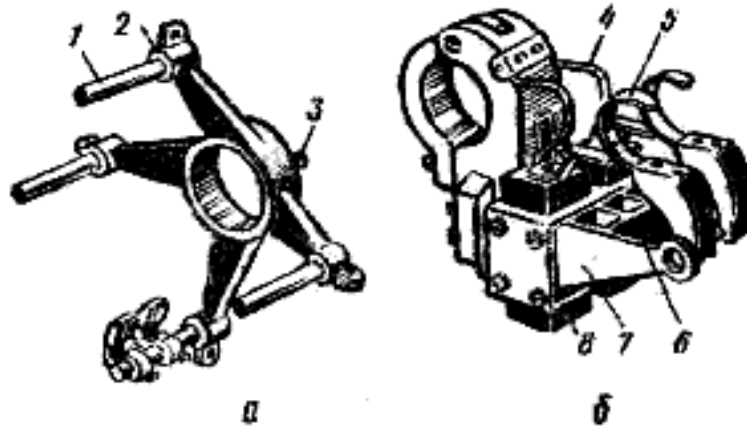
Якір машини постійного струму:

а — якір без обмотки; б — сталевий лист осердя якоря; 1 — натискні шайби; 2 — зубець; 3 — паз; 4 — вентиляційний отвір

Розрізняють основні й додаткові полюси. Основні полюси збуджують магнітне поле; тому обмотки їх котушок називають обмотками збудження. Додаткові полюси встановлюють у машинах підвищеної потужності (понад 1 кВт) для поліпшення роботи машини; обмотку додаткових полюсів з'єднують послідовно з обмоткою ротора (якоря).

Ротор (якір) машини постійного струму складається з осердя й обмотки.

Осердя якоря набирають з тонких листів електротехнічної сталі, ізолюваних один від одного лаковим покриттям, що зменшує втрати на вихрові струми. У пази осердя вкладають обмотку якоря. В осерді якоря роблять вентиляційні канали. Щоб струм від обмотки якоря в зовнішнє коло (у генераторі) або із зовнішнього кола до обмотки якоря (у двигуні) проходив в одному й тому самому напрямі, у машині постійного струму встановлюють колектор. Набирають його з мідних пластин, ізолюваних одна від одної міканітовими прокладками. Кожну пластину колектора з'єднують з одним або кількома витками обмотки якоря. Осердя якоря і колектор закріплюють на одному валу. Отже, колектор — це пристрій, який конструктивно об'єднаний з якорем (ротором) електричної машини і є механічним перетворювачем частоти. По ізолюваних один від одного і приєднаних до витків обмотки якоря пластинах, що становлять колектор, ковзають струмознімні щітки. Через ці щітки й колектор обмотка якоря приєднується до зовнішнього електричного кола. Щітки вставляють в обойми щіткотримача і притискають до колектора пружинами.



Будова колектора: 1 — корпус; 2 — болт; 3 — натискне кільце; 4 — міканітова прокладка; 5 — «півник»; 6 — «ластівчин хвіст»; 7 — колекторна пластина.

Щітковий механізм машини постійного струму:

а — траверса; б — щікотримач; 1 — щітковий палець; 2 — ізоляція кільця від траверси; 3 — стопорний болт; 4 — мідний провід; 5 — натискні пластини; 6 — місце розміщення пружини; 7 — обойма; 8 — щітка

Під час роботи машини щітки ковзають по колектору. Щікотримачі кріплять до траверси.

Генератор змінного струму — система з нерухомого статора (складається із сталевого осердя та обмотки) і ротора (електромагніт із сталевим осердям), який обертається всередині нього.

Через два контактних кільця, до яких притиснуті ковзні контакти щітки, проводиться електричний струм. Електромагніт створює магнітне поле, яке обертається з кутовою швидкістю обертання ротора та збуджує в обмотці статора ЕРС індукції.

Щоб ротор обертався і створював магнітне поле, яке викликає у статорі ЕРС індукції, йому необхідно надавати енергію. Ротор обертається у електростанціях за допомогою пари (ТЕС та АЕС) або гідротурбін (ГЕС).

Генератори змінного струму бувають із збудженням від постійних магнітів з електромагнітним збудженням.

Більшість генераторів, які використовуються в наш час, мають електромагнітне збудження.

Генераторна установка змінного струму, яка встановлюється в автомобілі, складається з генератора з електромагнітним збудженням, випрямляча й реле регулятора або регулятора напруги.

Генератори типу Г-250 (встановлюють на автомобілях серії ГАЗ і ЗІЛ), Г-266 (встановлюють на автобусі ПАЗ-672) і Г-288Е (встановлюють на автомобілях серії КрАЗ) мають однакову

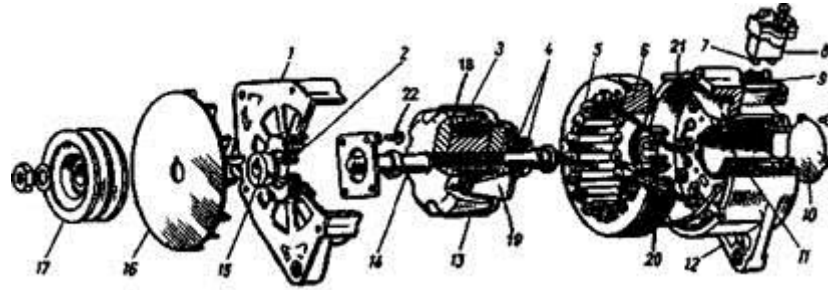


Рис. 13.1 Генератор змінного струму

Генератор змінного струму складається з (рис. 13.1) таких головних частин: статора 6, ротора 13, кришок 1 і 12; вентилятора 16 і шків 17.

Статор 6 генератора набраний з окремих пластин листової електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, покритих лаком для зменшення вихрових струмів.

Статор має 15 рівномірно розміщених по колу пазів, в які укладені окремі котушки трифазної обмотки 5. В кожній фазі розміщується по шість кат ушок, що з'єднуються між собою послідовно. Фази з'єднані в зірку, тобто початки котушок з'єднані разом, а кінці приєднані до трьох затискачів I, II, III колодки статора.

Ротор 13 складається із двох сталених кігтеподібних сердечників 18 і 19 та котушки збудження 3, яка розміщена на сталій втулці та жорстко закріплена на його валу 14. Кінці обмотки збудження припаяні до контактних кілець 4, напесованих на ізолювану втулку вала 14 ротора. Вал ротора обертається в кульових підшипниках 2 і 20, які розміщуються в передній 1 і задній 12 кришках.

Ротор генератора 13 приводиться в обертання одним або двома клиноподібними пасами через шків 17 від шків колінчастого вала. Шків 17 і вентилятор 16 для обдуву й охолодження генератора закріплені на передньому кінці вала.

На задній кришці генератора закріплено щіткотримач 8 із двома щіточками 7, притиснутими пружинами до контактних кілець. Одна щітка з'єднана з масою автомобіля, друга — із вивідним затискачем 3 на кришці корпусу генератора. Щітки призначені для з'єднання обмотки збудження ротора з джерелом живлення постійного струму (аккумуляторною батареєю або через випрямлений пристрій з обмоткою статора).

При включенні запалювання струм від аккумуляторної батареї через щітки й кільця поступає в обмотку збудження ротора і створює магнітне поле. При обертанні ротора силові лінії магнітного поля ротора перетинають витки котушок статора, і в них індуктується змінний струм, який знімається через три затискачі I, II, III статора і поступає до трьох затискачів випрямляча, за допомогою якого він

перетворюється в постійний, направляється до споживачів і на підзарядку акумуляторної батареї.

Випрямляч струму 2 розміщується в кришці 12 з боку контактних кілець, складений із кремнієвих вентилів (діодів), які допускають робочу температуру корпусу 150°C.

Кремнієвий випрямляч (Рис.13.2) складається із трьох моноблоків, які з'єднані в схему трифазного двоперіодного випрямляча. В кожен фазу включено два діоди, які розвернуті своїми переходами від струмопровідного затискача в різні боки: один діод гнучким провідником струму з'єднаний з від'ємною пластиною 3, а другий — із додатною.

Якщо на затискач пластини 6 пари діодів поступає струм із зарядом "+", то він буде зніматися через діод, з'єднаний з цією пластиною, при цьому перехід другого діода закритий. Під час другого півперіоду струм змінює напрям, тобто на затискач 6 він поступає з від'ємним зарядом. Тоді закривається діод, з'єднаний з додатною пластиною 6, і струм із від'ємним зарядом піде на пластину 3 через інші діоди.

Властивість напівпровідникових випрямлювачів пропускати струм тільки в одному напрямку дозволяє відмовитись від реле зворотного струму. Це значно спрощує конструкцію і знижує вартість реле-регулятора.

З підвищенням частоти обертання колінчастого вала підвищується частота обертання й ротора генератора. Внаслідок цього в обмотках статора збільшується і напруга. Щоб напруга залишалась в допустимих межах (приблизно 13,5-14,5). В при нормальній напрузі 12 В — призначений регулятор напруги, який за будовою поділяється на вібраційний, контактно-транзисторний, безконтактно-транзисторний.

В автомобілях використовують контактно-транзисторні регулятори напруги. Найпростішим контактно-транзисторним регулятором є реле-регулятор РР-362, що застосовується з генератором змінного струму Г-250 та інші.

ГПС призначені для перетворення механічної енергії, яка підводиться до вала якоря в електричну енергію постійного струму. Характеристики і властивості генераторів постійного струму визначаються в основному способом живлення обмотки збудження.

За способом живлення обмотки збудження розрізняють наступні **типи генераторів постійного струму:**

- з незалежним збудженням - обмотка збудження отримує живлення від стороннього джерела постійного струму;
- з паралельним збудженням - обмотка збудження (шунтова обмотка) підключена до обмотки якоря паралельно навантаженню;
- з послідовним збудженням - обмотка збудження (серієсна обмотка) підключена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням;

– зі змішаним збудженням - використовуються дві обмотки збудження: одна підключається паралельно навантаженню (шунтова обмотка), друга (серієсна обмотка) послідовно з навантаженням. Генератори різних типів збудження (рис. 13.2) мають однакову будову і відрізняються лише виконанням обмотки збудження.

Обмотки незалежного і паралельного збудження виготовляються з великою кількістю витків з обмотувального проводу малого перерізу, обмотки послідовного збудження виготовляються з невеликої кількості витків з обмотувального проводу великого перерізу. Генератори малої потужності іноді виготовляються з постійними магнітами. Характеристики таких генераторів наближені до характеристик генераторів з незалежним збудженням

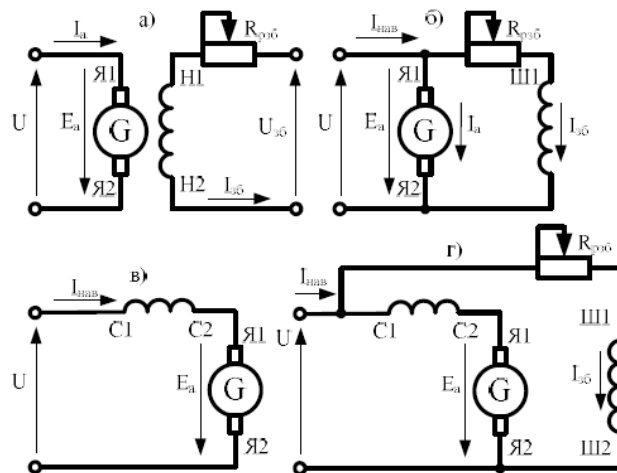


Рис. 13.2 - Схема генератора постійного струму незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження

Машини постійного струму використовуються як двигуни і як генератори. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю дуже простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Унаслідок цього ДПС переважно використовуються на транспорті, в підйомно-крановому обладнанні, на прокатних станах тощо. Мікродвигуни постійного струму широко використовуються в пристроях автоматичного керування.

Обмежене розповсюдження ДПС пов'язано з їхніми недоліками: у порівнянні з двигунами змінного струму при однаковій потужності ДПС мають більші габарити, масу, ціну, їхня конструкція складніша, вони менш надійні, бо мають ковзні електричні контакти. Крім того, для ДПС необхідні джерела живлення постійного струму, в той час як всюди поширені електромережі змінного струму.

Генератори постійного струму (ГПС) мають ще більш обмежене застосування, наприклад, в автономному електрообладнанні на транспорті, в установках електроживлення ДПС, в системах автоматичного регулювання та ін. Як стаціонарні джерела постійного струму і напруги ГПС програють за техніко-економічними показниками напівпровідниковим випрямлячам, що живляться від мереж змінного струму.

МПС можуть бути виконані на потужність від одиниць ватт до порядку десяти тисяч кіловатт. Їхня частота обертання може знаходитися в діапазоні від одиниць об/хв до тисяч об/хв. На малі і середні потужності МПС випускаються серійно, на великі потужності (сотні кВт і вище) - за спеціальним замовленням.

Вітчизняні МПС загальнопромислового призначення пройшли шлях розвитку в рамках серій П, 2П і 4П і продовжують його в серії 5П. Існують і спеціалізовані серії, наприклад краново-металургійні ДПС, рудничні ДПС. Свою специфіку, пов'язану з жорстко обмеженими установочними розмірами на рухомих засобах, мають тягові ДПС. Окремо стоять МПС для екскаваторів, сухопутних і морських бурових установок, шахтних підйомників, які характеризуються великою потужністю і важкими умовами експлуатації. Найбільшими і граничними за потужністю є ДПС головних приводів прокатних станів і криголамів.

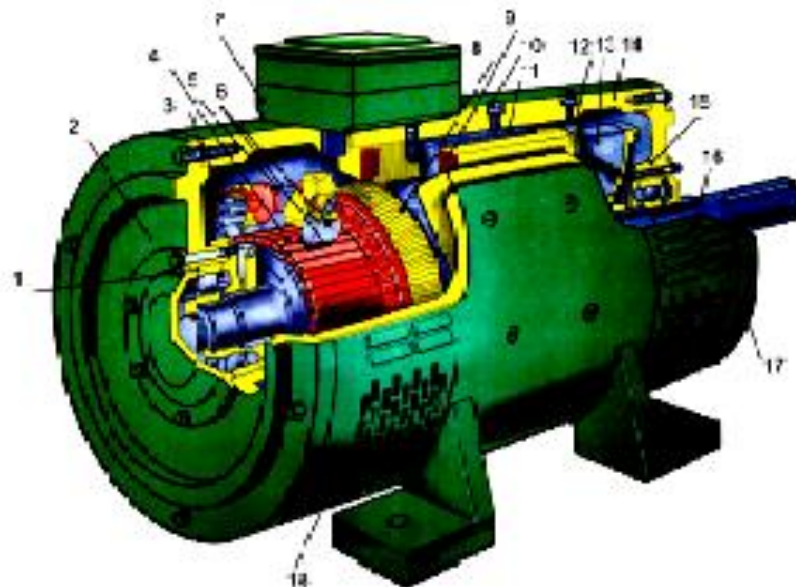


Рисунок 13.3 – Будова машини постійного струму

1 - підшипники; 2 - задній підшипниковий щит; 3 - траверса щіткоутримувачів; 4 - колектор; 5 – палець щіткоутримувача; 6 - щітки; 7 - коробка виводів; 8 - обмотка якоря; 9 - обмотка збудження; 10 – болтове кріплення полюса; 11 - осердя полюса; 12 -

повітронаправляючий щиток; 13 - вентилятор; 14 - корпус; 15 - передній підшипниковий щит; 16 - вал; 17 - жалюзі для виходу повітря; 18 - жалюзі для входу повітря.

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки.

Заміна двигунів серії 2П як закритого, так і захищеного виконання на двигуни уніфікованої конструкції серії 4П забезпечує збільшення номінальної потужності в заданому габариті на одну шкалу, зниження матеріалоемності на 15 - 20%, зменшення витрати обмотувальної міді на 25 - 35% і зниження трудомісткості виготовлення в 2,5 - 3 рази.

2. Принцип дії та основні рівняння ГПС.

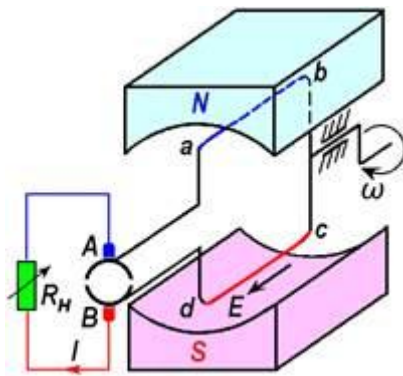


Рис. 1.1 Спрощена модель генератора ЕРС та струми постійного струму опорі навантаження б, в, г

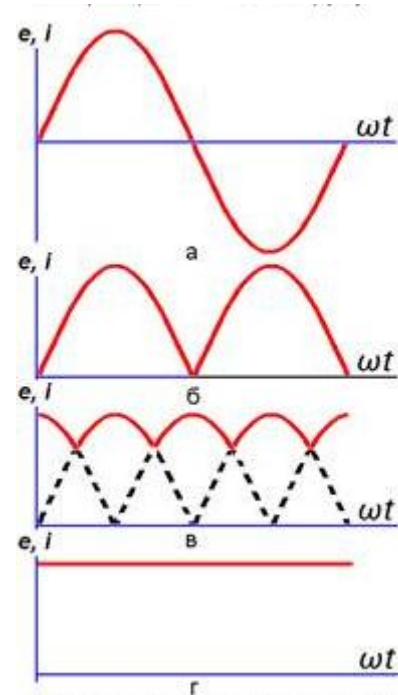


Рис. 1.2 Графік зміни в рамці а та на

Принцип дії генератора, як і будь-якої електричної машини, оснований на явищі електромагнітної індукції. Він полягає в тому, що при обертанні в магнітному полі електропровідної рамки (обмотки), у кожному з її провідників виникає *змінна* ЕРС. Миттєве значення цієї ЕРС *e* при рівномірному обертанні рамки з *кутовою частотою обертання (швидкістю обертання) ω*, визначиться згідно з (В.1):

$$e = 2B \cdot l \cdot v \cdot \sin(\omega t), \quad (1.1)$$

де t – час, с; а коефіцієнтом 2 враховується кількість провідників у рамці.

Щоб струм генератора у зовнішньому колі був постійним, цю ЕРС необхідно випрямити. В генераторах постійного струму для такого випрямлення використовується механічний випрямляч – *колектор зі щітками*. Розглянемо, як відбувається випрямлення змінної ЕРС, що створюється в електропровідній рамці **abcd**, розміщеній між полюсами **N** і **S** постійного магніту спрощеної моделі генератора постійного струму (рис. 1.1). Кінці рамки з'єднані з двома ізольованими між собою півкільцями, до яких дотикаються дві нерухомі щітки **A** і **B**. Рамка **abcd** завдяки *підшипнику* має можливість обертатися разом з півкільцями. ЕРС **E**, що створюється при обертанні рамки, викликає струм **I** в колі рамки та в зовнішньому колі: щітка **B** – R_n – щітка **A**. Напрямок і величина ЕРС і струму в рамці **abcd** (рис. 1.2, а) визначаються положенням провідників рамки під полюсами і напрямом обертання. В процесі обертання, незалежно від положення провідників, з щіткою **A** сполучений через “своє” півкільце провідник, що розташований під полюсом **N**, а з щіткою **B** – провідник, що розташований під полюсом **S**. Струм зовнішнього кола завдяки цьому завжди буде направлений від щітки **B** (її називають *позитивною*) до щітки **A** (*негативною*). На навантаженні R_n струм буде змінюватись лише за величиною, але не за напрямом, тобто, тут він пульсує від нуля до максимуму (рис. 1.2, б). Півкільця та щітки “перевертають” від’ємну півхвилю синусоїди.

Якщо у спрощеній моделі замість однієї, розташувати взаємно перпендикулярно дві рамки з чотирма пластинами, то це дозволить суттєво знизити пульсації ЕРС і струму (рис. 1.2, в), а вже при восьми рамках з відповідною кількістю пластин, пульсації зникнуть взагалі (рис. 1.2, г), тобто струм у зовнішньому колі стане постійним. Отже, в генераторі постійного струму завдяки колектору та щіткам відбувається *механічне випрямлення* змінного струму, що виникає в його *обмотці якоря*, в постійний струм зовнішнього кола. При ввімкненні навантаження, провідниками обмотки якоря генератора протікає струм, і згідно із законом Ампера на них будуть діяти електромагнітні сили, створюючи електромагнітний момент. Неважко переконатися, скориставшись правилом лівої руки, що цей момент буде направлений проти обертання, тобто є *гальмівним моментом*.

2.1 Основні рівняння ГПС. В процесі роботи генератора постійного струму в обмотці якоря індукуються ЕРС E_a . При підключенні до генератора навантаження в колі якоря виникає струм, а на виводах генератора встановлюється напруга, обумовлене рівнянням напруг для кола якоря генератора:

$$U = E_a - I_a \sum R. \quad (1)$$

Сумарний опір кола якоря генератора включає

$$\sum R = R_a + R_{\partial n} + R_{ko} + R_c + R_{щ}. \quad (2)$$

Сума опорів всіх ділянок кола якоря: обмотки якоря R_a , обмотки додаткових полюсів $R_{\partial n}$, компенсаційної обмотки R_{ko} , послідовної (серієсної) обмотки збудження R_c і перехідного щіткового контакту $R_{щ}$.

При відсутності в машині яких-небудь із зазначених обмоток в (2) не входять відповідні складові.

Якір генератора приводиться в обертання приводним двигуном, який

створює на валу генератора обертаючий момент M_1 . Якщо генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$), то для обертання його якоря потрібний порівняно невеликий момент холостого ходу M_0 . Цей момент обумовлений гальмівними моментами, що виникають у генераторі при його роботі в режимі х.х.: моментами від сил тертя і вихрових струмів у якорі.

При роботі навантаженого генератора в проводах обмотки якоря з'являється струм, який, взаємодіючи з магнітним полем збудження, створює на якорі електромагнітний момент M . У генераторі цей момент спрямований зустрічно обертаючому моменту приводного двигуна, тобто він є навантажувальним (гальмівним).

При незмінній частоті обертання ($n = const$) обертаючий момент приводного двигуна M_1 врівноважується сумою протидіючих моментів: моментом х.х. M_0 і електромагнітним моментом M , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (3)$$

Вираз (3) - рівняння моментів для генератора при $n = const$.

Помноживши члени рівняння (3) на кутову швидкість обертання якоря Ω , одержимо рівняння потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{\text{ем}}, \quad (4)$$

де- $P_1 = M_1 \Omega$ механічна потужність, спрямована від приводного двигуна до генератора;

$P_0 = M_0 \Omega$ - потужність х.х., тобто потужність, спрямована до генератора в режимі х.х. (при відключеному навантаженні);

$P_{\text{ем}} = M \Omega$ - електромагнітна потужність генератора.

Електромагнітна потужність

$$P_{\text{эм}} = E_a I_a, \quad (5)$$

або з урахуванням (3)

$$P_{\text{эм}} = U I_a + I_a^2 \sum R = P_2 + P_{\text{са}}, \quad (6)$$

де P_2 — корисна потужність генератора (електрична), тобто потужність, що віддається генератором навантаженню;
 P_{ea} — потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в колі якоря.

З урахуванням втрат на збудження генератора P_{ezb} , отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного струму:

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{ea} + P_{ezb}. \quad (7)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 ,

перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття

$$(P_0 + P_{ea} + P_{ezb}).$$

втрат. Тому що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їхньої характеристики розглядають за умови $n = const$. До основних характеристик генераторів постійного струму відносяться:

- характеристика холостого ходу - залежність напруги на виході генератора в режимі х.х. U_0 від струму збудження I_{zb} :

$$U_0 = f(I_{zb}) \text{ при } I_{zb} = 0 \text{ і } n = const;$$

- навантажувальна характеристика - залежність напруги на виході генератора U при роботі з навантаженням від струму збудження I_{zb} :

$$U = f(I_{zb}) \text{ при } I \neq 0 \text{ і } n = const;$$

- зовнішня характеристика - залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I :

$$U = f(I_{наб}) \text{ при } R_{pzb} = const \text{ і } n = const,$$

де R_{pzb} — регулювальний опір у колі обмотки збудження;

- регулювальна характеристика - залежність струму збудження I_{zb} від струму навантаження $I_{наб}$ при незмінній напрузі на виході генератора:

$$I_{zb} = f(I_{наб}) \text{ при } U = const \text{ і } n = const.$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості і якості генераторів постійного струму.

Контрольні питання

1. Яке призначення генератора?
2. Перечисліть основні вузли генераторів змінного та постійного струмів та їх призначення

3. Як індуктується змінний струм і перетворюється у постійний у генераторі?

4. Для чого обмотки котушок фаз статора з'єднуються послідовно, а не паралельно?

5. Яка будова й принцип роботи реле-регулятора?

6. Від яких показників у найбільшій мірі залежить напруга, що виробляється автомобільним генератором?

7. Що таке ротор, статор, якор?

1.13 ТЕМА РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДУ ТА НАВАНТАЖЕННЯ ГПС

План

1. Режим холостого ходу та навантаження ГПС.
2. Енергетична діаграма перетворення потужності в ГПС та енергетичні показники. Реакція якоря.

Мета: Засвоєння призначення та видів, принципу дії та рівнянь, що визначають основні властивості і закономірності, особливостей режимів роботи генераторів постійного струму.

1. Режим холостого ходу та навантаження ГПС.

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку

1, а. Реостат $R_{зб}$, включений в коло збудження, дає можливість регулювати струм $I_{зб}$ в обмотці збудження, а отже, і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

Характеристика холостого ходу. При знятті характеристики $U_0 = f(I_{зб})$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$). Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження $I_{зб}$ від нульового значення до $+I_B$, при якому напруга х.х. складає $U_0 = 1,15 \dots 1,25 U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривої 1 (рисунок 3). Початкова ордината кривої 1 не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження до нуля, і змінивши його напрям, поступово збільшують струм у колі збудження до $-I_{зб}$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається спадною гілкою характеристики. У першому квадранті крива 2

розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_{зб}$ до $I_{зб} = 0$, а потім збільшують його до значення $-I_{зб}$. В результаті одержують криву 3, яка називається висхідною гілкою характеристики х.х. Спадаюча і висхідна гілки характеристики х.х. утворюють петлю намагнічування (гістерезису). Провівши між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику х.х.

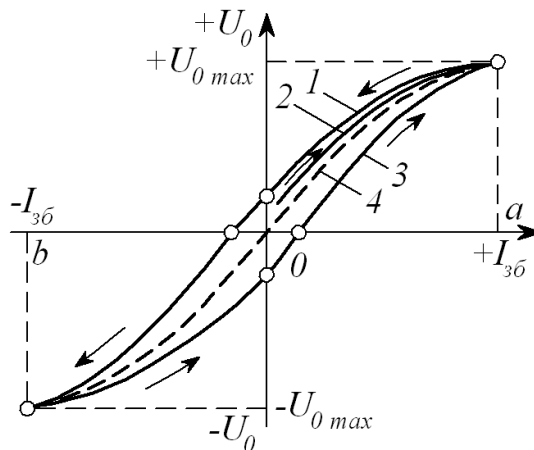


Рис. 3 - Характеристики холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика здобуває криволінійний характер.

Навантажувальна характеристика генератора. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму збудження $I_{зб}$ при незмінному струмі навантаження, наприклад номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рисунк 4). Якщо із точки a , що відповідає номінальній напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab , який дорівнює $I_a \Sigma R$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати точки a і c , то одержимо abc — трикутник реактивний (характеристичний). Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі збудження $I_{зб} = I_{номзб1}$ напруга на виводах $U_0 = U_{де}$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{ном} = U_{ае}$. Таким

чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{зб1} = I_{зб ном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася

в результаті дії двох причин: спадання напруги в колі якоря і впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши спадання напруги $I_a \Sigma R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \Sigma R$. На рисунку 3 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. $be \leq de$, що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі х.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{зб1} \square I_{зб2}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів збудження $(I_{зб1} - I_{зб2})$, являє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

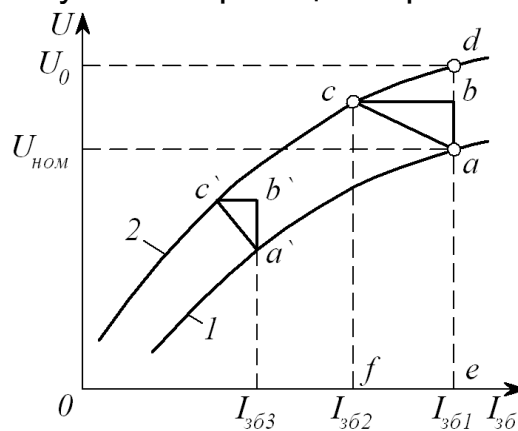


Рис. 4 - Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \Sigma R. \quad (8)$$

Струм збудження $(I_{зб1} - I_{зб2})$, що компенсує дію реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{зб}}, \quad (9)$$

де F_{qd} і F_{ad} — поперечна і поздовжня складові реакції якоря; $W_{зб}$ - число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$, побудований для іншого значення струму збудження $I_{зб3}$. Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму

навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася $b'c' = bc$, тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і дія реакції якоря.

2. Енергетична діаграма перетворення потужності в ГПС та енергетичні показники.

Реакція якоря.

Енергетична діаграма генератора паралельного збудження представлена на рисунку 1.

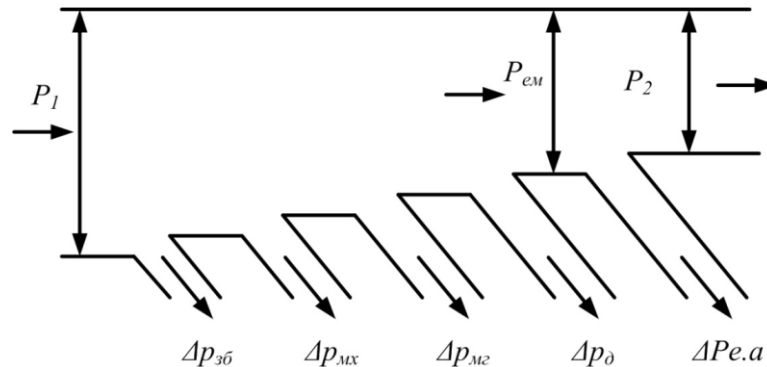


Рис.1 - Енергетична діаграма ГПС паралельного збудження

Отримана від первинного двигуна механічна потужність P_1 , за вирахуванням втрат механічних $\Delta p_{мх}$, магнітних $\Delta p_{мг}$ та додаткових Δp_{δ} перетворюється в якорі в електромагнітну потужність $P_{ем}$. Потужність $P_{ем}$ частково витрачається на електричні втрати $\Delta p_{е.а}$ в ланцюгу якоря (в обмотках якоря, додаткових полюсів та в компенсаційній і в перехідному опорі щіткового контакту), а решта цієї потужності є корисна потужність P_2 , яку генератор віддає споживачам. Втрати на збудження $\Delta p_{зб}$ в генераторі незалежного збудження покриваються за рахунок стороннього джерела струму. З урахуванням втрат на збудження генератора $P_{зб.е.}$, отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного

струму
$$P_1 = P_2 + \Delta p_0 + \Delta p_{е.а} + \Delta p_{е.зб}. \quad (1)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном P_1 , перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність P_2 , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на

покриття втрат $(\Delta p_0 + \Delta p_{е.а} + \Delta p_{е.зб})$. Тому що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їх характеристики розглядають за умови $n = const$.

2.1 Реакція якоря При холостому ході машини постійного струму в ній існує магнітне поле, яке створюється головними полюсами. При роботі машини з навантаженням струм в обмотці якоря створює магнітне поле якоря. Поле якоря, накладаючись на поле головних

полюсів, спотворює і зменшує його. Вплив магнітного поля якоря на магнітне поле головних полюсів називається **реакцією якоря**.

Магнітне поле головних полюсів машини і магнітне поле якоря утворюють результуюче поле. При встановленні щіток на геометричній нейтралі (рисунок 2), поле якоря направлено поперек вісі полюсів, і в даному випадку воно називається **полем поперечної реакції якоря**.

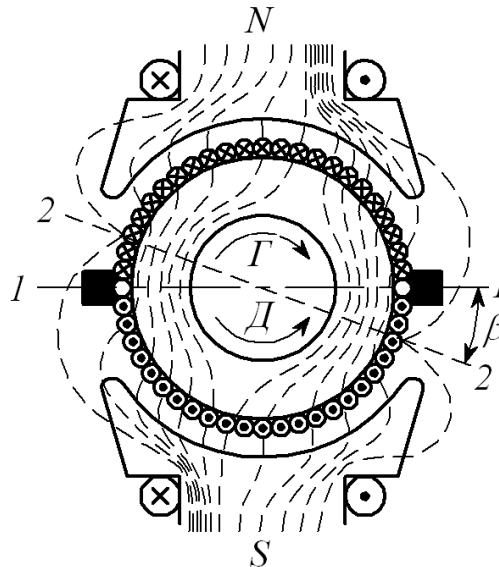


Рис. 2 - Результуюче магнітне поле при встановленні щіток на геометричній нейтралі

Поперечна реакція якоря викликає ослаблення поля під одним краєм полюса і його підсилення під іншим, внаслідок чого вісь результуючого поля повертається в **генераторі** за напрямком обертання якоря, а в **двигуні** – проти обертання якоря (рис. 3). Під дією поперечної реакції якоря, нейтральна лінія на поверхні якоря, на якій $B = 0$, повертається з положення геометричної нейтралі в положення, відхилене на деякий кут β . Таке положення називається **лінією фізичної нейтралі**. В генераторі фізична нейтраль розвернута в сторону обертання якоря, а в двигуні - у зворотну сторону.

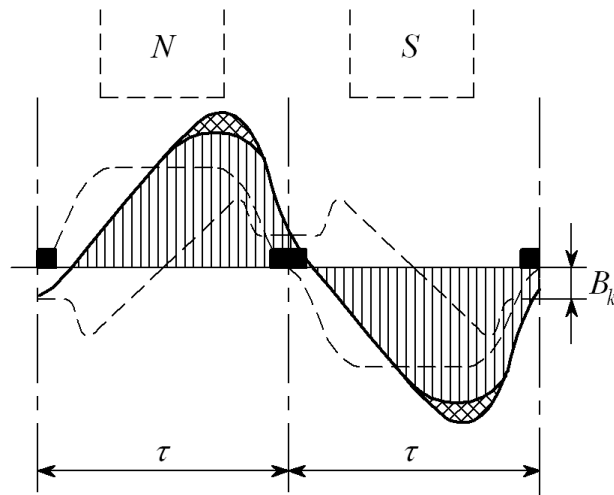


Рис. 3- Крива розподілення індукції в повітряному проміжку машини постійного струму

При встановленні щіток під кутом 90° до геометричної нейтралі, поле якоря буде діяти вздовж вісі полюсів і називається **полем повздовжньої реакції якоря**. В залежності від напрямку струму в якорі, магнітне поле якоря може здійснювати намагнічуючу і розмагнічуючу дію. Викривлення результуючого поля машини постійного струму несприятливо впливає на її робочі властивості і характеристики. Наслідки впливу реакції якоря на машину з ненасиченою магнітною системою:

- зрушення фізичної нейтралі відносно геометричної приводить до погіршення умов роботи щіткового контакту і може послужити причиною посилення іскріння на колекторі;
- викривлення результуючого поля машини спричиняє перерозподіл магнітної індукції в повітряному зазорі машини.

Це приводить до того, що миттєві значення ЕРС секцій обмотки якоря в моменти проходження їх пазових сторін у зоні максимальних значень магнітної індукції різко підвищуються. В результаті зростає напруга між сусідніми колекторними пластинами U_k , що при значних навантаженнях може призвести до перекривання електричною дугою міканітової прокладки між колекторними пластинами. Наявні на колекторі частки графіту будуть сприяти розвитку електричної дуги, що призведе до виникнення потужної електричної дуги, яка перекриє весь колектор або значну його частину.

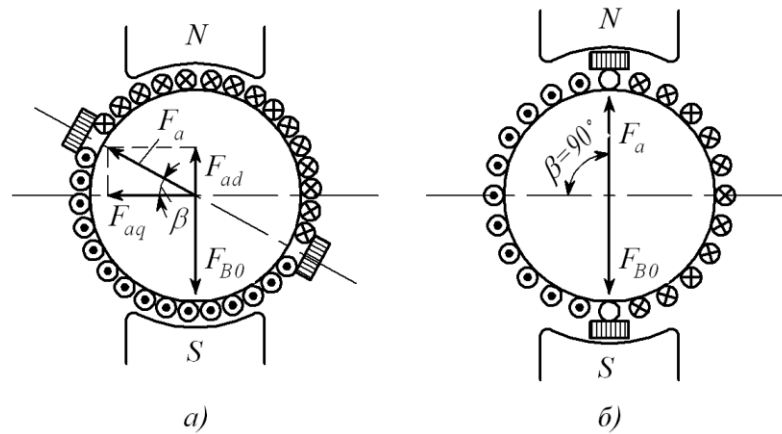


Рис. 5 – Складові MPC при зсуві щіток з геометричної нейтралі (а) і при утворенні поздовжньої складової MPC (б)

При насиченості магнітної системи машини, що має місце в більшості електричних машин, підмагнічування одного краю полюсного наконечника, що перебуває під ним зубцевої зони якоря, відбувається в меншому ступені, ніж розмагнічування іншого краю. При цьому розподіл магнітної індукції в проміжку стає більше рівномірним, однак результуючий магнітний потік машини при цьому зменшується. Таким чином, реакція якоря в машині з насиченою магнітною системою розмагнічує машину. В результаті погіршуються робочі властивості машини: у генераторів знижується ЕРС, у двигунів зменшується обертовий момент.

Вплив реакції якоря на роботу машини збільшується при зсуві щіток з геометричної нейтралі. Це пояснюється тим, що разом із щітками зміщується і вектор MPC якоря. При цьому MPC якоря F_a

утворюється поперечною $F_{aq} = F_a \cos \beta$ і поздовжньою складовою

$$F_{ad} = F_a \sin \beta,$$

що спрямована по вісі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря, поздовжня складова MPC якоря діє зустрічно MPC обмотки збудження F_{B0} , що послаблює основний магнітний потік машини; при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова MPC якоря F_{ad} діє узгоджено із MPC F_{B0} , що викликає підмагнічування машини і може бути причиною іскріння на колекторі. Якщо машина працює в режимі двигуна, то при зсуві щіток за напрямком обертання якоря, поздовжня складова MPC якоря F_{ad} підмагнічує машину, а при зсуві щіток проти обертання якоря поздовжня складова F_{ad} розмагнічує машину. Штучне утворення підмагнічуючої дії поздовжньої реакції якоря F_{ad} а машинах загальнопромислового виконання неприпустимо через порушення роботи щіткового контакту.

Зсув щіток з геометричної нейтралі впливає на поперечну складову MPC якоря - величину, що залежить від кута β , з ростом

якого вона зменшується ($F_{aq} = F_a \cos \beta$). Таким чином, в машинах постійного струму можливі такі випадки:

- щітки встановлені на геометричній нейтралі і реакція якоря має тільки поперечну складову;
- щітки зміщені з геометричної нейтралі і реакція якоря має дві складові: поперечну і поздовжню.
- щітки розташовані по вісі, перпендикулярній геометричній нейтралі, (тобто коли $\beta = 90^\circ$), при цьому реакція якоря по поперечній вісі відсутня.

Однак такий випадок не має практичного застосування, тому що машина стає непрацездатною: в генераторному режимі ЕРС машини дорівнює нулю, тому що в паралельну гілку обмотки входить рівне число секцій із зустрічним напрямком ЕРС, в режимі двигуна електромагнітні сили сторін обмотки якоря, що діють ліворуч і праворуч від осі щіток, рівні і протилежно направлені, а тому обертаючий момент не створюється. У зв'язку з тим, що реакція якоря негативно впливає на робочі властивості і характеристики машини постійного струму, при проектуванні машини вживають низку заходів щодо усунення дії реакції якоря або ослаблення її впливу до допустимих меж.

Найбільш ефективним засобом зменшення впливу поперечної складової реакції якоря є застосування в машині компенсаційної обмотки. Компенсаційну обмотку укладають в пази полюсних наконечників (рис. 6) і включають послідовно з обмоткою якоря таким чином, щоб МРС компенсаційної обмотки F_k була протилежна за напрямком МРС обмотки якоря F_a . Компенсаційну обмотку виконують розподіленою по поверхні полюсних наконечників всіх головних полюсів машини.

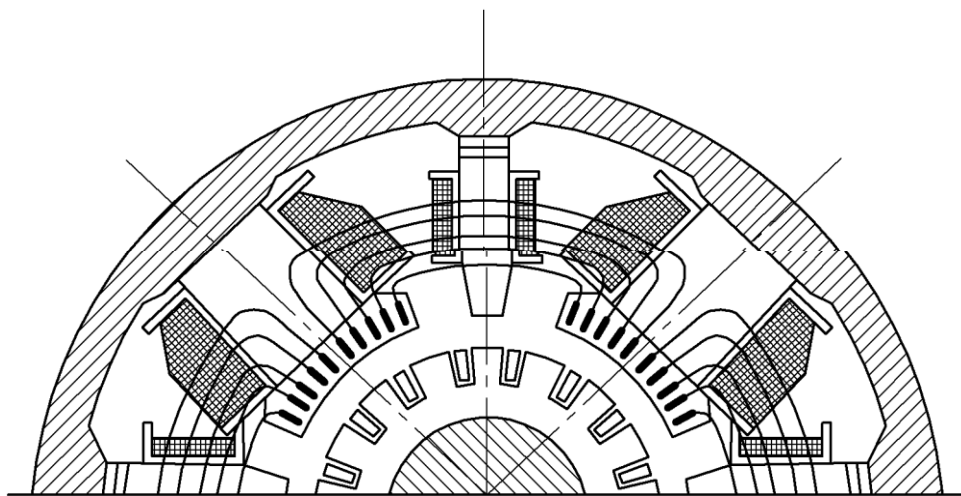


Рис. 6 – Компенсаційна обмотка машини постійного струму

Включення компенсаційної обмотки послідовно в коло якоря забезпечує автоматичність компенсації МРС якоря при будь-якому (у межах номінального) навантаженні машини. Таким чином, у машині постійного струму з компенсаційною обмоткою при переході від холостого ходу до режиму навантаження закон розподілу магнітної індукції в повітряному проміжку залишається практично незмінним. Однак у просторі між полюсами, частина МРС якоря залишається не скомпенсованою. Небажаний вплив цієї частини МРС на роботу щіткового контакту компенсують застосуванням в машині додаткових полюсів. Компенсаційні обмотки застосовують лише в машинах середньої і великої потужності - більше 150 - 500 кВт при $U_n B \leq 440$, які працюють із різкими коливаннями навантаження і різкими змінами режиму роботи.

Пояснюється це тим, що компенсаційна обмотка збільшує вартість і ускладнює машину. У машинах малої і середньої потужності, в яких не використовується компенсаційна обмотка, шкідливий вплив поперечної складової реакції якоря послаблюється відповідним вибором повітряного проміжку під головними полюсами. При цьому слід враховувати, що при досить малому повітряному проміжку і значному струмі якоря, поперечна складова реакції якоря може не тільки послабити магнітне поле під однією з частин головного полюса, але й змінити полярність. Деяке збільшення повітряного проміжку під головними полюсами, особливо на їх краях, значно послаблює дію реакції якоря. Однак, при збільшенні повітряного проміжку, виникає необхідність підвищення МРС обмотки головних полюсів, що веде до збільшення розмірів полюсних котушок, полюсів і габаритів машини. На цьому ж принципі зменшення МРС поперечної складової реакції якоря за рахунок підвищеного магнітного опору на шляху її дії, заснований і інший спосіб послаблення дії реакції якоря. Цей спосіб полягає в тому, що осердя головних полюсів виготовляють з листів анізотропної (холоднокатаної) сталі (сталь марки 3411). За напрямком прокату така сталь має підвищену магнітну проникність, а поперек напрямку прокату - невеликою магнітною проникністю. Штампування і збирання полюсів з листів такої сталі виконується таким чином, щоб вісь полюса співпадала з напрямком прокату.

Контрольні питання:

1. Як поділяють генератори постійного струму за способом збудження?
2. Які серії генераторів постійного струму випускаються промисловістю?
3. З яких складових складається сумарний опір якорного кола?
4. Як визначається потужність, необхідна для приводу генератора постійного струму? Які складові входять до рівняння механічної потужності?

5. Якими основними характеристиками визначаються режими роботи генераторів постійного струму? Поясніть можливість отримання навантажувальної характеристики за допомогою реактивного трикутника.

1.14 ТЕМА ГПС НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ: ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ВЛАСТИВОСТІ

1. ГПС незалежного збудження: електрична схема, характеристики та властивості.
2. ГПС паралельного і змішаного збудження: електрична схема, характеристики та властивості.
3. Принцип самозбудження.

Мета: Засвоєння та виявлення особливостей перетворення енергії в генераторах постійного струму.

1. Генератори постійного струму незалежного збудження: електрична схема, характеристики та властивості

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку 7. Реостат $R_{рзб}$ включений в коло збудження дає можливість регулювати струм $I_{зб}$ в обмотці збудження і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

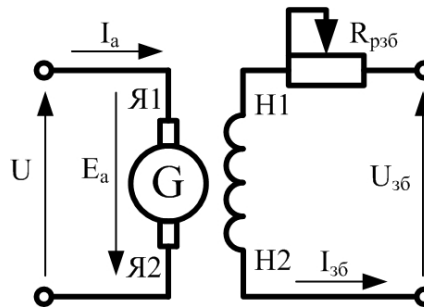


Рисунок 7 - Схема генератора постійного струму незалежного збудження

Характеристика холостого ходу. При знятті характеристики $U_{зб} = f(I_0)$ генератор працює в режимі х.х. ($I_a = 0$) Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження $I_{зб}$ від нульового значення до $I_{нб}$, при якому напруга х.х. складає $U_0 = 1,15 \dots 1,25 U_{ном}$. Одержують дані для побудови кривої 1 (рис. 8). Початкова ордината кривої 1 не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження

до нуля, і змінивши його напрям, поступово збільшують струм у колі збудження до $-I_{зб}$. Отримана в такий спосіб крива 2 називається спадною гілкою характеристики. У першому квадранті крива 2 розташовується вище кривої 1. Пояснюється це тим, що в процесі зняття кривої 1 відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто зменшують струм збудження від $-I_{зб}$ до $I_{зб} = 0$, а потім збільшують його до значення $+I_{зб}$. В результаті одержують криву 3, яка називається висхідною гілкою характеристики х.х. Спадна і висхідна гілки характеристики х.х. утворять петлю намагнічування (гістерезису). Провівши між кривими 2 і 3 середню лінію 4, отримаємо розрахункову характеристику х.х. незалежного збудження

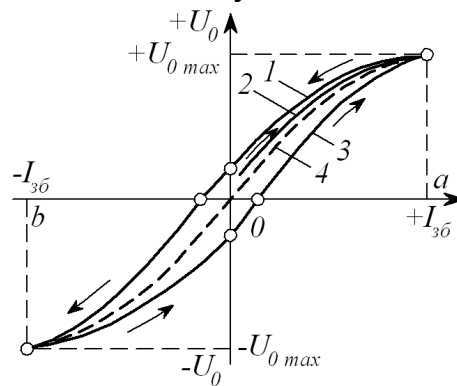


Рисунок 8 - Характеристики холостого ходу генератора постійного струму

Прямолінійна частина характеристики х.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика здобуває криволінійний характер.

Навантажувальна характеристика генератора. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виході генератора від струму збудження $I_{зб}$ при незмінних: струмі навантаження, наприклад номінальному, і частоті обертання. При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика 1 розташовується нижче характеристики холостого ходу 2 (рисунок 9). Якщо із точки a , що відповідає номінальній

напрузі $U_{ном}$, відкласти вгору відрізок ab , який дорівнює $I_a \sum R$, і провести горизонтально відрізок bc до перетинання з характеристикою х.х., а потім з'єднати точки a і c , то одержимо abc — трикутник реактивний (характеристичний). Так, при роботі генератора в режимі х.х. при струмі збудження $I_{зб} = I_{збном}$ 1 напруга на виводах $U = E$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_{ae ном}$. Таким

чином, відрізок da виражає значення напруги $\Delta U = U_0 - U_{ном}$ при $I_{зб1} = I_{збном}$. Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: спадання напруги в колі якоря і впливу реакції якоря. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши спадання напруги $I_a \sum R$, можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження: $E_a = U + I_a \sum R$. На рисунку 3 ця ЕРС представлена відрізком be . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж у режимі х.х. $be \leq de$, що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки c опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі х.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{зб2} \leq I_{зб1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів збудження ($I_{зб1} - I_{зб2}$), являє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

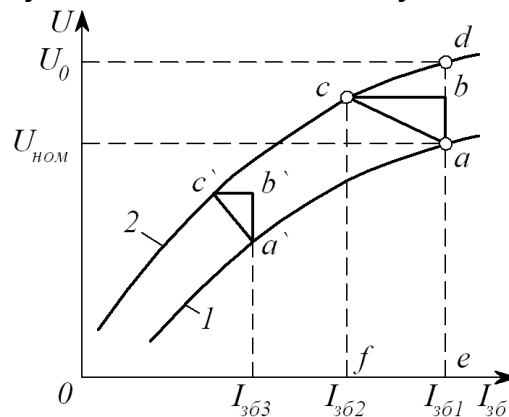


Рисунок 9 - Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Катети реактивного трикутника кількісно визначають причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: спадання напруги в ланцюзі якоря визначає катет

$$ab = I_a \sum R. \quad (2)$$

Струм збудження $(I_{зб1} - I_{зб2})$, що компенсує дію реакції якоря, визначає катет

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2W_{зб}}, \quad (3)$$

де F_{qd} і F_{ad} - поперечна і поздовжня складові реакції якоря; $W_{зб}$ - число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник $a'b'c'$, побудований для іншого значення струму збудження $I_{зб3}$. Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінною ($a'b' = ab$), що пояснюється незмінністю струму

навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася $b'c' \leq bc$, тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і дія реакції якоря.

Зовнішня характеристика генератора. Ця характеристика представляє собою залежність напруги U на виводах генератора від струму навантаження $I_{\text{нав}}$. При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики, генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю і навантажують його до номінального струму при номінальній напрузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження до х.х. ($I_{\text{нав}} = 0$), знімають показання приладів. Опір кола збудження $R_{\text{зб}}$ і частоту обертання протягом досліду підтримують незмінними. На рисунку 3 представлена зовнішня характеристика генератора незалежного збудження, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження $I_{\text{нав}}$ напруга на виводах генератора знижується; це пояснюється впливом реакції якоря і спаданням напруги в колі якоря. Нахил зовнішньої характеристики до осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною напруги генератора при зниженні навантаження

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Зазвичай для генератора незалежного збудження $\Delta U_{\text{ном}} = 5 \div 10\%$.

Регульовальна характеристика генератора. Характеристика $I_{\text{зб}} = f(I_{\text{нав}})$ показує, як необхідно змінювати струм у колі збудження, щоб при змінах навантаження генератора напруга на його виводах залишалася незмінною, рівній номінальній. При цьому частота обертання зберігається постійною ($n = \text{const}$). При роботі генератора без навантаження в колі збудження встановлюють струм $I_{\text{зб}0}$, при якому напруга на виводах генератора стає рівною номінальній.

Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм збудження таким чином, щоб напруга генератора у всьому діапазоні навантажень залишалася рівною номінальній. Так одержують висхідну гілку характеристики (рисунк 10, б, крива 1). Поступово зменшуючи навантаження генератора до х.х. і регулюючи відповідним чином струм навантаження, одержують спадну гілку характеристики (рисунк 10, б, крива 2). Спадна гілка регульовальної характеристики розташована нижче висхідної, що пояснюється впливом збільшеного залишкового намагнічування магнітного кола машини в процесі зняття висхідної гілки. Середню криву 3, проведену між висхідною й спадною гілками, називають практичною регульовальною характеристикою генератора.

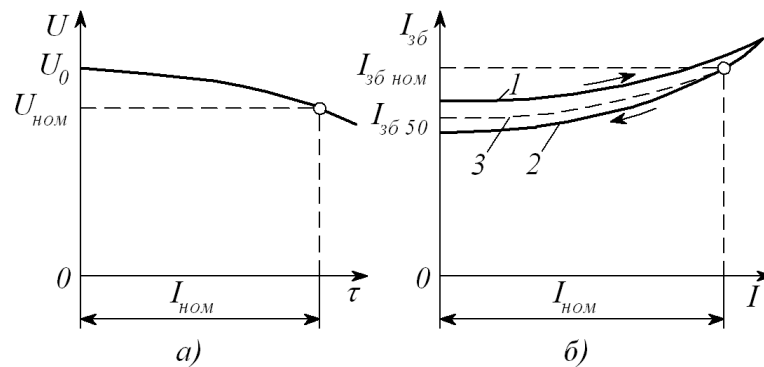


Рис. 10- Зовнішня (а) і регулювальна (б) характеристики генератора незалежного збудження

Основний недолік генераторів незалежного збудження - це необхідність застосування стороннього джерела енергії постійного струму. Однак можливість регулювання напруги в широких межах, а також порівняно жорстка зовнішня характеристика цього генератора є його перевагами.

Контрольні питання:

1. Як розподіляються втрати електричної потужності в генераторах постійного струму? Які складові потужності визначають енергетичні показники генераторів?
2. Що називається реакцією якоря? Яким чином реакція якоря впливає на процеси в генераторах постійного струму?
3. Яким чином можливе зменшення впливу реакції якоря? Якими заходами: конструкційними та електричними, здійснюють зменшення впливу реакції якоря?
4. Якими основними характеристиками визначаються якості генераторів постійного струму незалежного збудження?
5. Наведіть переваги і недоліки генераторів постійного струму незалежного збудження.

2. Генератори постійного струму паралельного і змішаного збудження: електрична схема, характеристики та властивості

Навантажувальна і регулювальна характеристики генератора паралельного збудження практично не відрізняються від відповідних характеристик генератора незалежного збудження.

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рисунок 1, крива 1, менш жорстка, ніж у генератора незалежного збудження. Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження, крім причин, що викликають зменшення напруги в генераторі незалежного збудження (реакція якоря і спадання напруги в колі якоря), діє третя причина - зменшення струму збудження, викликана зниженням напруги від дії перших двох причин.

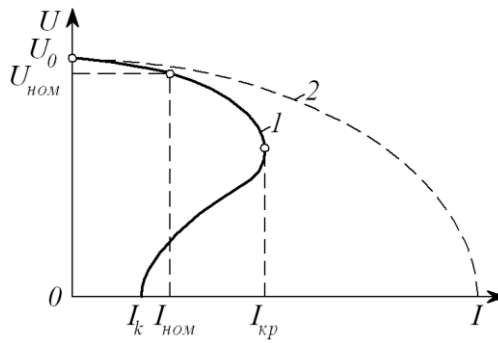


Рис. 1 - Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Цією особливістю пояснюється і те, що при поступовому зменшенні опору навантаження $R_{нав}$ струм збільшується лише до критичного значення $I_{кр}$, а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися. Струм навантаження досягає значення при короткому замиканні $I_{нав} < I_{кр}$. Справа в тому, що зі збільшенням струму підсилюється розмагнічування генератора (посилення реакції якоря і зменшення струму збудження), машина переходить в ненасичений стан, при якому навіть невелике зменшення опору навантаження викликає різке зменшення ЕРС машини. Тому що струм визначається напругою на виводах генератора U і опором навантаження $R_{нав}$, тобто $I = U / R_{нав}$, то при струмах навантаження $I_{нав} < I_{кр}$, коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж зменшується опір навантаження, відбувається зростання струму навантаження. Після того як $I_{нав} = I_{кр}$, подальше зменшення $R_{нав}$ супроводжується зменшенням струму навантаження, тому що в цьому випадку напруга U зменшується швидше, ніж зменшується опір навантаження $R_{нав}$.

Таким чином, коротке замикання, викликане повільним зменшенням опору навантаження, не небезпечно для генератора паралельного збудження. Але при раптовому к.з. магнітна система генератора не встигає розмагнітитися і струм досягає небезпечних для машини значень $I_k = (8..12)I_{ном}$ (рисуюнок 1, крива 2). При такому різкому зростанні струму навантаження, на валу генератора виникає значний гальмівний момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить у круговий вогонь. Тому необхідно захищати генератор від перевантаження і к.з. Генератори паралельного збудження широко застосовують в установках постійного струму, тому що відсутність збуджувача вигідно відрізняє ці генератори від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного порушення становить 10-30%.

Генератор змішаного збудження має паралельну і послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється в основному паралельною обмоткою (60-80% від загального потоку). Послідовна

обмотка включається згідно з паралельною (щоб МРС обмоток склалися), що забезпечує одержання жорсткої зовнішньої характеристики генератора.

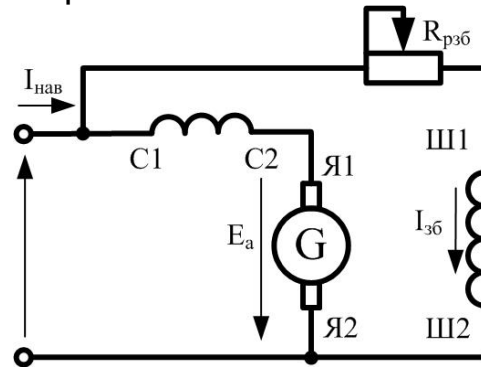


Рисунок 1.1 - Електрична схема ГПС змішаного збудження

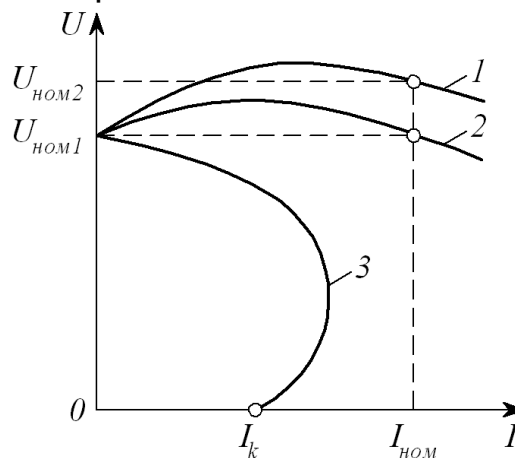


Рисунок 2 - Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

В режимі х.х. генератор має тільки паралельне збудження, тому що $I_{нав} = 0$. З появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, що підмагнічуючи машину, компенсує дію реакції якоря і спадання напруги в якорі.

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш жорсткою (рис. 2, крива 2), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму залишається майже незмінною. Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (наприкінці лінії) залишалася практично незмінною, то число витків послідовної обмотки збільшують таким чином, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще й спадання напруги в проводах лінії (рис. 2, крива 1).

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора із збільшенням струму навантаження різко зменшується (рис. 2, крива 3), що пояснюється дією розмагнічення магнітного кола послідовною обмоткою збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки. Зустрічне включення обмоток застосовують лише в генераторах спеціального призначення, наприклад у зварювальних, де необхідно одержати круто падаючу зовнішню характеристику.

Генератори змішаного порушення зі згідним включенням обмоток

збудження застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли потрібна сталість напруги в лінії.

3. Принцип самозбудження ГПС

Принцип самозбудження генератора постійного струму заснований на тому, що магнітна система машини, будучи збудженою, зберігає тривалий час невеликий магнітний потік залишкового магнетизму осердя полюсів і станини $\Phi_{\text{зал}}$ (порядку 2—3% від повного потоку). При обертанні якоря потік індукує у якірній обмотці ЕРС $E_{\text{зал}}$, під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм $I_{\text{збзал}}$. Якщо МРС обмотки збудження $I_{\text{зб зал}}$ $W_{\text{зб}}$ має такий же напрямок, як і потік $\Phi_{\text{зал}}$, то вона збільшує потік головних полюсів. Це, у свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, від чого струм збудження знову збільшиться. Так буде тривати до тих пір, поки напруга генератора не буде врівноважена спаданням напруги в колі збудження, тобто $I_{\text{зб}} R_{\text{зб}} = U_0$. На рисунку 3 наведена характеристика х.х. генератора (крива 1) і залежність спадання напруги від струму збудження $I_{\text{зб}} R_{\text{зб}} = f(I_{\text{зб}})$ (пряма 2). Точка перетинання А відповідає закінченню процесу самозбудження, тому що саме в ній $U_0 = I_{\text{зб}} R_{\text{зб}}$.

Кут нахилу прямій ОА до осі абсцис визначається із трикутника ОАВ:

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_{\text{зб}}} = R_{\text{зб}}, \quad (1)$$

де m_i - масштаб струму (по осі абсцис), А/мм;
 m_u - масштаб напруги (по осі ординат), В/мм.

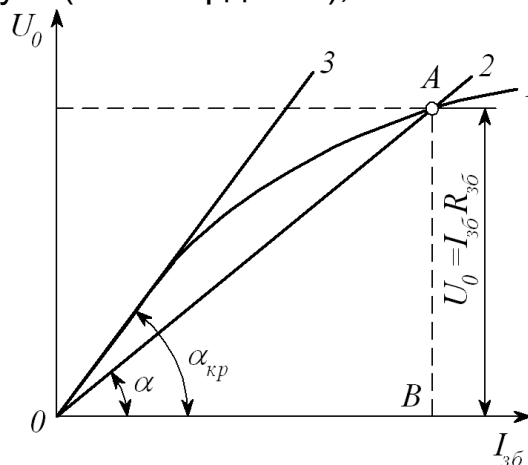


Рис. 3 - До принципу самозбудження ГПС паралельного збудження

З (1) необхідно, щоб кут нахилу прямої $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ до осі абсцис прямо пропорційний опорі кола збудження. Однак, при деякому значенні опорі реостата $R_{зб}$ опір $R_{зб}$, досягає значення, при якому залежність $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$ стає дотичною до прямолінійної частини характеристики х.х. (пряма 3). При виникненні цієї ситуації генератор не самозбуджується. Опір кола збудження, при якому припиняється самозбудження генератора, називають критичним опором $R_{зб\text{ крит}}$. Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну $n_{кр}$. Ця умова витікає з характеристики самозбудження генератора (рис. 4), що представляє собою залежність напруги генератора в режимі х.х. від частоти обертання при незмінному опорі кола збудження, тобто $U_0 = f(n)$ при $R_{зб} = \text{const}$. Аналіз характеристики самозбудження показує, що при $n_{кр} = n$ збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, тому що процесу самозбудження не відбувається і поява напруги на виході генератора обумовлена лише залишковим намагнічуванням магнітного кола генератора. Процес самозбудження починається при $n_{кр} = n$. У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким ростом напруги U_0 .

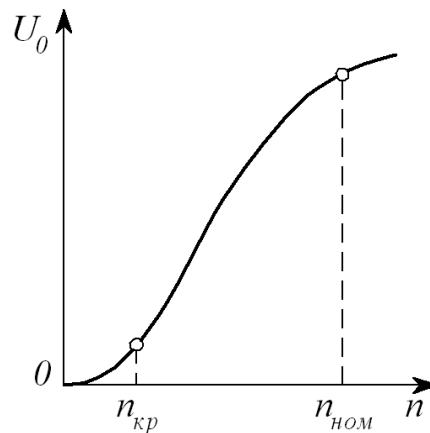


Рис. 4- Характеристика самозбудження ГПС паралельного збудження

Однак при частоті обертання, близької до номінального, зростання напруги вповільнюється, що пояснюється магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опорі кола збудження і з ростом останнього збільшується.

Таким чином, самозбудження генераторів постійного струму можливо при дотриманні наступних умов:

- магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм;
- приєднання обмотки збудження повинне бути таким, щоб МРС обмотки збігалася за напрямком з потоком залишкового магнетизму $\Phi_{зал}$;

- опір кола збудження повинний бути менше критичного;
- частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Оскільки генератор паралельного збудження самозбуджується лише в одному напрямку, то характеристика $x.x.$ цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта вісі координат.

Контрольні питання:

1. Наведіть особливості генераторів постійного струму паралельного і змішаного збудження.
2. Якими характеристиками визначаються якості і особливості генераторів паралельного і змішаного збудження?
3. Наведіть умови, які необхідні для здійснення самозбудження генератора постійного струму паралельного збудження.
4. Якими характеристиками визначаються умови, при яких можливе самозбудження генераторів?
5. Яким чином параметри генератора впливають на перебіг процесу самозбудження генератора?

1.15 ТЕМА ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ВИДИ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ (ДПС). ПРИНЦИП ДІЇ ТА ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ДПС

План

1. Призначення та види двигунів постійного струму (ДПС).
2. Принцип дії та основні рівняння ДПС.
3. Енергетична діаграма перетворення потужності в ДПС.
4. Номінальні дані ДПС.

Мета: Засвоєння принципу дії та основних рівнянь, що характеризують властивості і процеси, що відбуваються в двигунах постійного струму.

1. Призначення та види двигунів постійного струму (ДПС).

Двигуни постійного струму широко застосовуються в промислових, транспортних, кранових та інших установках, де необхідне регулювання частоти обертання в широкому діапазоні. Одна і та ж електрична машина може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Ця властивість електричних машин має назву зворотності.

Припустимо, що до двигуна підведена напруга $U_{\text{мережі}} = \text{const.}$ При заданій на рисунку 6.1 полярності полюсів та напрямку струму I_a в якорі (обмотка якоря показана тільки одним проводом) на валу двигуна створюється обертовий електромагнітний момент M , направлений проти напрямку обертання годинникової стрілки.

Під дією цього моменту ротор двигуна обертається у напрямку моменту з постійною частотою n . Застосовуючи правило правої руки, визначаємо, що в провідниках обмотки якоря наводиться ЕРС e_a , яка

направлена зустрічно відносно струму якоря, і тому її називають противо-ЕРС якоря і розглядають як електромагнітну протидію двигуна відносно напруги мережі U мережі.

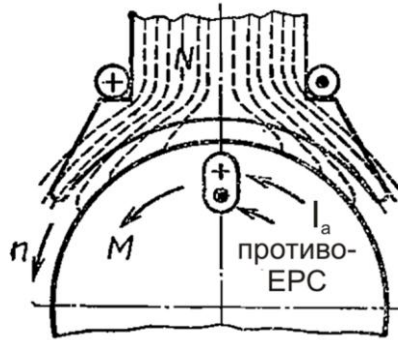


Рис. 1 – Напрямок моменту та противо-ЕРС обмотки якоря двигуна

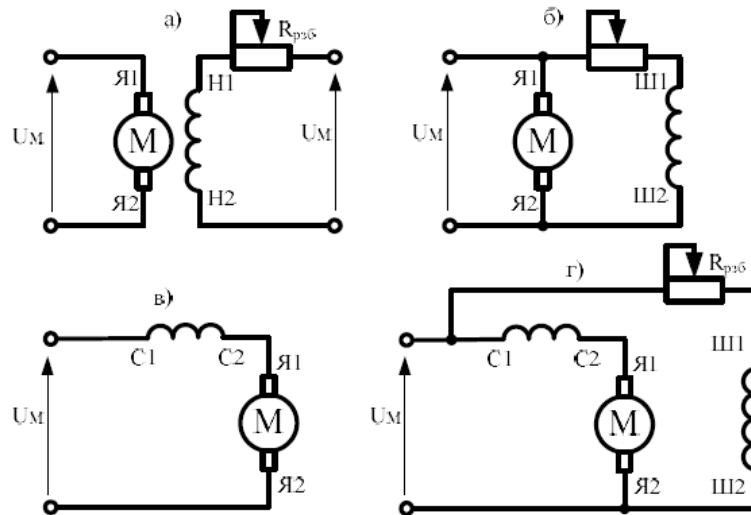
Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- по регулювальних властивостях: двигуни з нормальним регулюванням - до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регулювальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2 – 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами.

За способом живлення обмотки збудження розрізняють наступні типи двигунів постійного струму:

- з незалежним збудженням - обмотка збудження ДПС отримує живлення від стороннього джерела постійного струму; (рис. 2, а)
- з паралельним збудженням - обмотка збудження ДПС (шунтова обмотка) та обмотка якоря підключені паралельно мережі живлення; (рис. 2, б)
- з послідовним збудженням - обмотка збудження ДПС (серієсна обмотка) підключена послідовно з обмоткою якоря і мережею живлення; (рис. 2, в)
- зі змішаним збудженням - використовуються дві обмотки збудження: одна підключається паралельно джерела живлення (шунтова обмотка), друга (серієсна обмотка) послідовно з обмоткою якоря. (рис. 2, г).



Я1-Я2 – обмотка якоря; Н1-Н2 – обмотка незалежного збудження; Ш1-Ш2 – обмотка паралельного збудження; С1-С2 – обмотка послідовного збудження.

Рис. 2 - Схема двигуна постійного струму незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного (г) збудження

2. Принцип дії та основні рівняння двигунів постійного струму

Машини постійного струму мають властивість зворотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження і в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створює на якорі електромагнітний момент M , що є не гальмівним, як це мало місце в генераторі, а обертовим.

Під дією електромагнітного моменту якоря машина почне обертатися, тобто машина буде працювати в режимі двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну. У процесі роботи двигуна його якор обертається в магнітному полі. В обмотці якоря індуктується ЕРС E_a , напрямок якої можна визначити за правилом «правої руки». Вона не відрізняється від ЕРС, що наводиться в обмотці якоря генератора. У двигуні ж ЕРС спрямована проти струму I_a , і тому її називають протиелектрорушійною силою (противо-ЕРС) якоря.

Для двигуна, що працює з постійною частотою обертання,

$$U = E_a + I_a \sum R. \quad (1)$$

З (1) видно, що підведена до двигуна напруга врівноважується противо-ЕРС обмотки якоря і спаданням напруги в колі якоря. На підставі (1) струм якоря R

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum R}. \quad (2)$$

Помноживши обидві частини рівняння (1) на струм якоря I_a , отримаємо рівняння потужності для кола якоря

$$UI_a = I_a^2 \sum R + E_a I_a, \quad (3)$$

де UI_a - потужність в колі обмотки якоря;

$I_a^2 \sum R$ - потужність електричних втрат в колі якоря.

Для з'ясування сутності виразу $E_a I_a$ проведемо наступне перетворення

$$E_a I_a = \frac{pN}{60a} \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\omega}{2\pi} I_a, \quad (4)$$

або

$$E_a I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \omega, \quad (5)$$

$$[pN / (2\pi a)] \Phi I_a = M, \quad (6)$$

тоді

$$E_a I_a = M\omega = P_{em}, \quad (7)$$

де $\omega = 2\pi n / 60$ - кутова частота обертання якоря;

P_{em} - електромагнітна потужність двигуна.

Отже, вираз $E_a I_a$ являє собою електромагнітну потужність двигуна.

Перетворивши вираження (3) з урахуванням (4), одержимо

$$UI_a = M\omega + I_a^2 \sum R. \quad (8)$$

Аналіз цього рівняння показує, що із збільшенням навантаження на валу двигуна, тобто із збільшенням електромагнітного моменту M , зростає потужність у колі обмотки якоря UI_a , тобто потужність на вході двигуна. Але тому що напруга, що підводиться до двигуна, підтримується незмінною ($U = const$), то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму в обмотці якоря I_a .

В залежності від способу збудження двигуни постійного струму, так само як і генератори, розділяють на двигуни зі збудженням від постійних магнітів (магнітоелектричні) і з електромагнітним збудженням. Останні у відповідності зі схемою включення обмотки збудження відповідно обмотки якоря підрозділяють на двигуни

незалежного, паралельного (шунтові), послідовного (серієсн) і змішаного збудження.

Відповідно до формули $E_a = c_e \Phi n$ частота обертання двигуна (об/хв.)

$$n = E_a / (c_e \Phi). \quad (9)$$

Підставивши значення E_a з рівняння (1), отримаємо

$$n = \frac{U - I_a \Sigma R}{c_e \Phi}, \quad (10)$$

тобто частота обертання двигуна прямо пропорційна напрузі і обернено пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це пояснюється тим, що підвищення напруги U або зменшення потоку Φ

викликає збільшення різниці ($U - E_a$); це, в свою чергу, веде до зростання струму I_a . Внаслідок цього збільшення струму підвищує обертовий момент, і якщо при цьому навантажувальний момент залишається незмінним, то частота обертання двигуна збільшується. З рівняння (10) виходить, що регулювати частоту обертання двигуна можна зміною або напруги U , що підводиться до двигуна, або основного магнітного потоку Φ , або електричного опору в колі якоря ΣR . Напрямок обертання якоря залежить від напрямків магнітного потоку збудження Φ і струму в обмотці якоря. Тому, змінивши напрямок будь-якої із зазначених величин, можна змінити напрямок обертання якоря. Необхідно зауважити, що перемикання загальних затисків схеми живлення не дає зміни напрямку обертання якоря, тому що при цьому одночасно змінюється напрямок струму і в обмотці якоря, і в обмотці збудження.

3. Енергетична діаграма перетворення потужності в ДПС.

Представимо обертове магнітне поле асинхронного двигуна у вигляді поля двох полюсів магніту, що обертаються в просторі з синхронною кутовою швидкістю (рис.1.1.18)

$$\omega_1 = 2\pi n_1 / 60.$$

В провідниках замкненої обмотки ротора при обертанні полюсів будуть наводитися струми. Від взаємодії поля полюсів з струмами ротора виникнуть електромагнітні сили F_{em} під дією яких ротор буде обертатися в той же бік, що і полюси магніті, тільки з дещо меншою, ніж синхронна ω_1 , кутовою швидкістю

$$\omega_2 = 2\pi n_2 / 60.$$

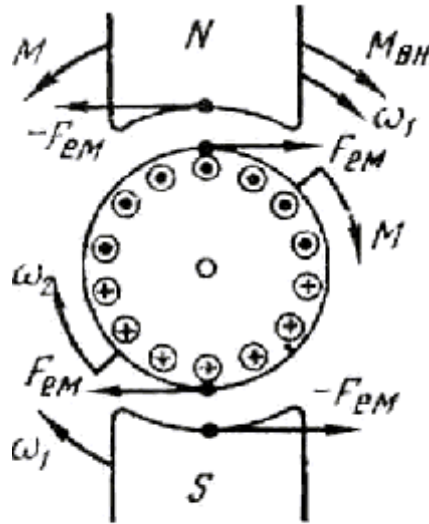


Рис. 1.1.18. Принцип дії асинхронного двигуна

При цьому внаслідок рівності діючих сил силам, протидіючим на полюси магніту, так же як і на ротор, будуть діяти сили, по величині рівні силам, що діють на ротор F_{em} , а за напрямком їм зворотні. І ті і другі сили будуть створювати моменти M і $-M$, рівні за величиною, але протилежні за напрямком.

Щоб обертати полюси магніту постійною швидкістю ω_1 , до них необхідно ззовні прикласти момент $M_{зн}$, за величиною рівний моменту електромагнітних сил M , діючих на полюси, а за напрямком йому протилежний. Тому, для обертання полюсів до них необхідно ззовні підвести потужність

$$P_{em} = M_{зн} \omega_1 = M \omega_1, \quad (1.1.34)$$

яка в реальному асинхронному двигуні передається від статора до ротора обертовим магнітним полем. Вона менша потужності $P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \phi_1$, що підводиться до статора з мережі, на величину втрат в обмотці статора $P_{em} = M_{зн} \omega_1 = M \omega_1$ і втрат в сталі статора P_{m1} :

$$P_{em} = P_1 - m_1 I_1^2 r_1 - P_{m1}, \quad (1.1.35)$$

де m_1 — число фаз обмотки статора.

Ротор двигуна розвиває момент M і обертається з кутовою швидкістю ω_2 . Повна механічна потужність, що розвивається ротором,

$$P'_2 = M \omega_2 \quad (1.1.36)$$

менша слабомагнітної потужності P_{em} , в чому неважко пересвідчитися, порівнюючи вирази (1.1.34), (1.1.36) і враховуючи, що $\omega_2 < \omega_1$. Пояснюється це тим, що частина поступаючої в ротор електромагнітної потужності йде на покриття електричних і обмотці ротора: $P_{e2} = m_2 I_2^2 r_2$ (магнітні втрати в роторі внаслідок малої частоти $f_2 = f_1 s$ незначні і ними можна знехтувати):

$$P_2' = P_{em} - P_{e2}. \quad (1.1.37)$$

Корисна механічна потужність на валу двигуна P_2 менша повної механічної потужності P_2' . Це пояснюється тим, що частина потужності P_2 йде на покриття механічних втрат на тертя $P_{мех}$ (в підшипниках, до повітря, в ковзаючих контактах), пульсуючих $P_{пульс}$ і додаткових $P_{дод}$ втрат, що складають 0,5-1% від P_2 :

$$P_2 = P_2' - P_{мех} - P_{пульс} - P_{дод}. \quad (1.1.38)$$

З урахуванням (1.1.38), (1.1.37) і (1.1.35) можна записати

$$P_2 = P_1 - P_{e1} - P_{m1} - P_{e2} - P_{мех} - P_{пульс} - P_{дод}. \quad (1.1.39)$$

Рівнянню (1.1.39) відповідає енергетична діаграма асинхронного двигуна, представлена на рис. 1.1.19.

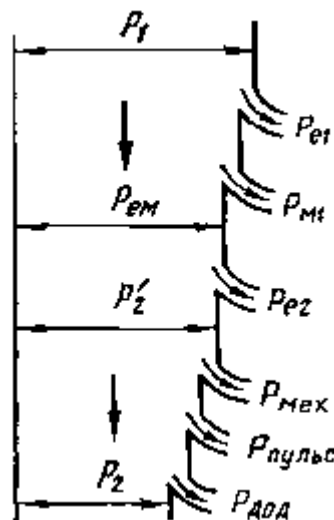


Рис. 1.1.19 Енергетична діаграма асинхронного двигуна

ККД асинхронного двигуна

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Для сучасних трифазних асинхронних двигунів номінальне значення ККД складає $0,5 \div 0,95$. З підвищенням номінальної потужності двигуна ККД підвищується.

Використовуючи отримані рівності, можна вивести досить важливі енергетичні відношення для асинхронного двигуна.

Дійсно, з (1.1.37) з урахуванням (1.1.36) і (1.1.34)

$$P_{e1} = P_{em} - P_2' = M\omega_1 - M\omega_2 = (\omega_2 - \omega_1)\omega_1 M / \omega_1,$$

або з урахуванням того, що $(\omega_2 - \omega_1)\omega_1 = s$,

$$P_{e2} = sP_{em}, \quad M\omega_1 = P_{em}. \quad (1.1.40)$$

Таким чином, *електричні втрати в роторі прямо пропорційні ковзанню s і електромагнітній потужності P_{em} .*

З виразу (1.1.40) випливає, що

$$P_{em} = P_{e2} / s. \quad (1.1.41)$$

Підставимо вираз (1.1.40) в (1.1.37), тоді

$$P_2' = P_{em} - P_{e2} = P_{em} - sP_{em} = (1-s)P_{em}, \quad (1.1.42)$$

або, замінивши P_{em} на P_{e2}/s [див. (1.1.41)],

$$P_2' = \frac{1-s}{s} P_{e2} = \frac{1-s}{s} m_2 l_2'^2 r_2 = \frac{1-s}{s} m_1 l_2'^2 r_2' \quad (1.1.43)$$

де l_2'' і r_2' - відповідно струм і активний опір обмотки ротора, приведені до кількості витків і фаз обмотки статора.

Враховуючи, що $P_{em} = M\omega_1$, рівність (1.1.34) (приймаючи до уваги (1.1.41)) можна переписати

$$M\omega_1 = P_{e2} / s,$$

Звідки неважко знайти вираз електромагнітного моменту

$$M = P_{e1} / (\omega_1 s) = m_1 l_2'^2 r_2' / (\omega_1 s) \quad (1.1.44)$$

Тут $\omega_1 = 2\pi n_1 / 60$, але так як $n_1 = f_1 60 / p$, то

4. Номінальні дані ДПС.

Серед ДПС двигуни з незалежним збудженням є найбільш розповсюдженими, а в замкнених системах керування електроприводами постійного струму в основному використовуються тільки вони. Двигун характеризується наступними паспортними даними, які знаходяться на його табличці:

- P_n , кВт – номінальна потужність, це механічна потужність на валу двигуна, на яку може розраховувати користувач;
- U_n , В – номінальна напруга якоря;
- I_n , А – номінальний струм якоря;
- n_n , об/хв.. – номінальна частота обертання;
- $U_{n.зб}$, В – номінальна напруга збудження;
- $I_{n.зб}$, А – номінальний струм збудження;
- η_n □ – номінальний ККД.

Номінальна потужність електричної машини це потужність, на яку розрахована дана машина за умовами нагрівання та безаварійної роботи протягом установленого терміну експлуатації. Номінальні потужності всіх видів електричних машин стандартизовані, так само стандартизовані і номінальні частоти обертання. Електричні машини випускають на стандартні напруги, узгоджені зі стандартними напругами електричних ланцюгів (220 В, 380 В), стандартна напруга генераторів на 5-10% вища, ніж двигунів, що викликано втратами напруги в електричних колах.

Машини постійного струму використовуються як двигуни і як генератори. Широке розповсюдження машин постійного струму, незважаючи на більшу вартість і складність в експлуатації і обслуговуванні порівняно з іншими видами обертових машин, пояснюється можливістю дуже простого і надійного регулювання частоти обертання, більшими пусковими моментами і високою перевантажувальною здатністю.

Серія 2П машин постійного струму охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт. Машини 2П серії призначені для роботи в електроприводах з широким регулюванням швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах серії 2П підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, поліпшені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи. Виходячи з вимог сучасного електропривода в основу створення нового покоління машин серії 4П покладені наступні принципи диференціації двигунів постійного струму:

- по регульовальних властивостях: двигуни з нормальним регулюванням - до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;
- по типу конструкції: закриті, захищені;
- за умовами експлуатації: нормальні, з важкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регульовальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2 – 3 рази) трудомісткості виготовлення таких двигунів у новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного встаткування, створеного для серії 4А.

В уніфікованій конструкції типу 4ПО і 4ПБ магнітопровід статора неявнополюсний з розподіленими обмотками в пазах. Обмотка збудження укладається у два пази в межах полюсної дуги основного потоку, компенсаційна обмотка розташовується рівномірно у всіх пазах розточки статора.

В уніфікованій конструкції 4ПО і 4ПБ однакові габарити із двигунами серії 4А, можуть бути застосовані однакові станини, задні підшипникові щити, деталі вентиляційного вузла, коробки виводів, підшипники і їхні кришки.

Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

- розподіл статорних обмоток двигунів у порівняно великій кількості пазів, що приносить позитивний ефект, що виражається в поліпшенні тепловіддачі, і дозволяє істотно збільшити щільності струмів;
- повна компенсація поля реакції якоря по всій його окружності;
- застосування повністю шихтованого магнітопроводу, що зменшує його магнітну несиметрію і практично усуває відставання в часі змін магнітного потоку додаткових полюсів від зміни струму в їхніх обмотках і, отже, підвищує комутаційну здатність двигунів у стаціонарних і динамічних режимах роботи;
- перехід до ступеня захисту IP44 в уніфікованих двигунах від звичайно застосовуваної у двигунах традиційної явнополюсної конструкції ступеня захисту IP23, що підвищує надійність цих двигунів в експлуатації.

Технічні дані двигунів. У паспорті двигуна та довідкової літератури на двигуни постійного струму вказані наступні технічні дані: номінальна напруга U_n , потужність P_n , частота обертання n_n , струм I_n , ККД.

Під номінальним U_n розуміють напругу, на яку розраховані обмотка якоря і колектор, а також у більшості випадків і паралельна обмотка збудження. З урахуванням номінального напруги вибирають електроізоляційні матеріали двигуна.

Номінальний струм I_n - максимально допустимий струм (споживаний з мережі), при якому двигун нагрівається до найбільшої

допустимої температури, працюючи в тому режимі (тривалому, повторно-короткочасному, короткочасному), на який розрахований:

$$I_H = I_{яH} + I_{BH} ,$$

де $I_{яH}$ - струм якоря при номінальному навантаженні; I_{BH} - струм обмотки збудження при номінальній напрузі.

Слід зазначити, що струм збудження I_{BH} двигуна паралельного збудження порівняно малий, тому при номінальному навантаженні зазвичай приймають

$$I_{яH} = I_H .$$

Номінальна потужність P_H - це потужність, що розвивається двигуном на валу при роботі з номінальним навантаженням (моментом) і при номінальній частоті обертання n_H .

Частота обертання n_H , і ККД відповідають роботі двигуна зі струмом I_H , напругою U_H без додаткових резисторів у ланцюгах двигуна.

У загальному випадку потужність на валу P_2 , момент M і частота обертання n пов'язані співвідношенням:

$$P_2 = \frac{M \cdot n}{9550} .$$

Споживана двигуном з мережі потужність P_1 , величини P_2 , ККД, U , I зв'язані співвідношеннями:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} ,$$

$$P_1 = UI ,$$

$$\text{де } I = I_{я} + I_{в} .$$

Очевидно, що ці співвідношення справедливі також і для номінального режиму роботи двигуна.

Контрольні питання

1. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму. Які серії двигунів постійного струму найбільш поширені?

2. Що називається електромагнітною потужністю двигуна постійного струму? Як визначається електромагнітна потужність:?
3. Наведіть основні рівняння двигуна постійного струму.
4. Наведіть енергетичну діаграму перетворення потужності в двигуні постійного струму. З яких складових складається енергетична діаграма?
5. Як визначається ККД двигуна постійного струму? Наведіть методики визначення ККД двигуна постійного струму.

Список рекомендованої літератури

Базова

1. Кислицын А. Л. Синхронные машины: Учебное пособие по курсу «Электромеханика»./ А.Л. Кислицын – Ульяновск: УлГТУ, 2000.–108 с.
2. Кацман М. М. Справочник по электрическим машинам: Учеб. пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования/ М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
3. Кацман М. М. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. пособие для электротехнических специальностей техникумов./ М.М. Кацман.– М.: ФОРУМ, ИНФРА – М, 2002. – 264 с. – (Серия «Профессиональное образование»).
4. Кацман М.М. Электрические машины. - М.: Высшая школа, 2002. — 463 с.
5. Правила устройства электроустановок, 7-е издание, Издательство ДЕАН, 2006 г.
6. Справочник электромонтера. В.В. Москаленко. - М.:Академия», 2008. — 368 с.

Допоміжна

1. Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини): Лабораторний практикум з дисципліни «Енергетичні засоби в АПК (Електричні машини) для студентів спеціальності 6.091901 – «Енергетика сільськогосподарського виробництва»/Укл.: М.О. Чуєнко, Р.М. ЧуєнкоЮ, А.Г. Кушніренко. – Ніжин, 2009. – 276 с.
2. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник/М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.
3. Партала О.И. Справочник радиокомпоненты и материалы. - М.,1990. — 416 с.
4. Березкина Т.Ф. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. - М.: Высшая школа, 1998. — 380 с.

Інформаційні ресурси

1. Вольдек А.И. Электрические машины, Учебник для вузов
http://techliter.ru/load/uchebniki_posobya_lekcii/ehlektrotekhnika/ehlektricheskie_mashiny_voldek_a_i_uchebnik_dlja_vuzov/57-1-0-1016
2. Электронный учебник по электрическим машинам
<http://www.studfiles.ru/dir/cat39/subj1378/file15278.html>
3. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов
<http://findknig.com/book.php?id=2439097>
4. Кацман М.М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу.
http://www.electrolibrary.info/bestbooks/b_uch.htm

Рясна Ольга Василівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Методичні вказівки щодо виконання самостійної роботи (частина 2)

Суми, РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г.-Кондратьєва 160

Підписано до друку: ____ 2021 р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman Суг
Тираж: 30 примірників Замовлення ____ № ____ Ум. друк. арк. 1,3