



УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Системи електричної тяги»

С.П. Калиниченко, Н.П. Карпенко

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Конспект лекцій з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Частина I

Харків 2012

Калиниченко С.П., Карпенко Н.П. Машины постійного

струму: Конспект лекцій. –Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Ч.1. – 69 с.

Розглянуто загальні питання теорії електричних машин, подано режими їх роботи та різновиди. Можливо використовувати як теоретичне джерело при вивчення дисципліни «Електричні машини».

Рекомендується для студентів спеціальностей «Електричні машини» та «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» денної та заочної форми навчання.

Іл. 63.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри систем електричної тяги 1 червня 2009 р., протокол № 10.

Рецензент

доц. А.Ф. Агулов

С.П. Калиниченко, Н.П. Карпенко

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Конспект лекцій з дисципліни
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Частина I

Відповідальний за випуск Калиниченко Н.П.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 26.10.09 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк.1,75. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Системи електричної тяги»

С.П. Калиниченко, Н.П. Карпенко

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Конспект лекцій з дисципліни «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Частина перша

Харків 2012

Калиниченко С.П., Карпенко Н.П. Машини постійного струму: Конспект лекцій. –Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 70 с. – Ч.1.

Розглянуто загальні питання теорії електричних машин, подано режими їх роботи та різновиди. Можливо використовувати як теоретичне джерело при вивченні дисципліни «Електричні машини».

Рекомендується для студентів спеціальностей «Електричні машини» та «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» денної та заочної форми навчання.

Лл. 63.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри систем електричної тяги 1 червня 2009 р., протокол № 10.

Рецензент

доц. А.Ф. Агулов

ВСТУП

Електричні машини – це електромеханічні перетворювачі енергії. Генератори перетворюють механічну енергію в електричну, двигуни – електричну в механічну. Електричні машини бувають постійного та змінного струмів. Найбільш потужні існують генератори змінного струму. Їх потужність сягає 1млн кВт і більше. Генератори постійного струму в залежності від вимог практики не будуються більшими, ніж 10 000 кВт, і використовуються в судових та металургійних широкорегульованих приводах. Двигуни змінного струму мають вагомий недолік – складність регулювання частоти обертання. Однак їх використання у зв'язку з втіленням в практику тиристорних джерел живлення повсякдень зростає.

Крім генераторів та двигунів, в електричних машинах розглядаються електростатичні апарати для перетворення параметрів змінного струму – трансформатори.

Крім силових приводів, електричні машини знаходять використання в різних проводах для контролю параметрів режиму роботи чи для управління різними технологічними процесами. Ці машини об'єднує загальна назва – мікромашини, які бувають як змінного, так і постійного струмів. У зв'язку з широким використанням перетворювальної техніки електричні машини змінного струму живляться імпульсним ввімкненням тиристорів, завдяки чому можна будувати регульовані за частотою обертання електроприводи з машинами змінного струму.

Машини постійного струму можуть одержувати живлення спрямленим змінним струмом, в якому, крім постійного, є частка змінного струму. Такі системи широко застосовуються на транспорті в електровозах змінного струму, в станкобудівній та інших галузях промисловості.

Електричні машини використовуються дуже часто, так як саме вони є силовими елементами різних механізмів, які застосовуються людством.

Електричні машини є надійними перетворювачами енергії. Надійність забезпечується накопиченими знаннями з теорії та практики побудови електричних машин, а також матеріалами, з яких вони будуються.

Матеріали для електричних машин діляться на основні групи: активні, ізоляційні та конструктивні. Активними є провідники електричного струму та магнітні сталі для проходження магнітного потоку. Як провідниковий матеріал найбільш часто застосовують мідь. Питома вага її $8,9 \text{ Т/м}^3$, питомий електричний опір при 15°C $1/57 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, температурний коефіцієнт – $0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$. У трансформаторах та роторах асинхронних двигунів також застосовується алюміній. Алюмінієві провідники більш дешеві й легкі порівняно з мідними. Їх питома вага становить $2,7 \text{ Т/м}^3$, питомий опір при 15°C $1/35,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$, температурний коефіцієнт практично такий же, як для міді. Крім названих провідникових матеріалів використовуються також сплави різних кольорових металів, які застосовуються в пускових обмотках синхронних машин і робочих обмотках роторів асинхронних двигунів.

Для проведення магнітного потоку в кожній електричній машині є магнітне коло, будувати яке найбільш складно. Магнітне коло повинне при мінімальному намагнічуванні створювати робочий магнітний потік та проводити його з мінімальними втратами потужності. Магнітне коло є найважчою частиною електричної машини і її раціональне використання збільшує техніко-економічні показники електричних машин. Феромагнітні матеріали, які використовуються в складі магнітного кола, мають загальну властивість магнітного насичення. При зростанні щільності магнітного потоку або магнітної індукції в окремих частинах магнітного кола зростання намагнічуючої сили йде спочатку повільно, а при відносно великих індукціях – вельми інтенсивно. Кожний магнітний матеріал, який застосовується в магнітопроводі, характеризується кривою намагнічування, яка являє собою залежність магнітної індукції B від напруженості магнітного поля H . При значеннях індукції до 1 Тл сталь слабо насичена і залежність $B=f(H)$ близька до лінійної. При значеннях $B > 1,3 \text{ Тл}$ нелінійні властивості виявляються сильно, а при $B > 1,8 \text{ Тл}$ має місце сильнонасичений стан. Раціональним вибором розмірів частин магнітного кола та марок електротехнічних сталей вдається досягати умов оптимального проектування, які характеризуються хорошою магнітною провідністю при найменших втратах потужності.

Магнітні втрати потужності виникають в частинах магнітного кола, які перемагнічуються. У машинах постійного струму це осердя якоря, а в машинах змінного струму – осердя статора, в трансформаторах – весь магнітопровід. Для зниження магнітних втрат потужності застосовується розшарування осердя пластинами електротехнічної сталі, які одержують методом штампування на спеціальних пресах. Товщина листів для осердів електричних машин складає 0,5 мм, для трансформаторів – 0,35 мм й менше. Для зниження магнітних втрат в склад електротехнічних сталей входить кремній. На магнітні властивості впливає технологія прокату листів гарячим чи холодним способом.

Марки сталей: 1212, 1312, 1412 – гарячекатані; 2011, 2012, 2111, 2211, 2311, 2411 – холоднокатані з ізотропними магнітними властивостями; 3413 – холоднокатана з анізотропними властивостями. Перша цифра в позначенні марки сталі вказує на клас за структурним станом та способом прокату; друга цифра – вміст кремнію: 0 – не більше 0,4%, 1 – від 0,4 до 0,8%, 2 – від 0,8 до 1,8% і т. д.; третя цифра – питомі магнітні втрати потужності при тестових випробуваннях зразків сталі (чим менша цифра, тим менші втрати); четверта цифра для характеризування властивостей магнітопроводу не використовується.

Ізоляційні матеріали ізолюють струмопровідні частини від корпусу. Довговічність та надійність електричних машин залежить насамперед від якості електричної ізоляції. Ізоляція являє собою складну композицію електроізоляційних матеріалів, які просочуються різними лаками та компаундами. Головними вимогами до ізоляції є механічна та електрична міцність, теплопровідність, вологостійкість, нагрівостійкість. Остання властивість визначає термін служби електричної машини. Нагрів електричної ізоляції призводить до старіння і з часом до теплового пробою. Тому електрична машина повинна в робочих режимах нагріватись не вище визначених норм, які забезпечують термін служби до 25 і більше років.

Для ізоляції провідників струму використовуються різні стрічкові синтетичні матеріали, які намотуються в декілька шарів залежно від рівня робочої напруги. Для ізоляції окремих вузлів використовуються виключно слюдяні ізоляційні матеріали.

Конструкційні матеріали в електричних машинах такі ж, як і в галузі загального машинобудування: сталь, чавун, пластмаси та ін. Особливим виробом, який застосовується в електричних машинах, є електрощітки для передачі струму від нерухомої частини до тих, які обертаються (колектори машин постійного струму, контактні кільця в машинах змінного струму). Електрощітки виготовляються на основі графіту з різними домішками за складною технологією. Від якості щіток, особливо в машинах постійного струму, залежить безіскрова робота машини і її надійність.

1 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Принцип роботи машини постійного струму

Машини постійного струму (МПС) працюють за принципом закону електромагнітної індукції, який говорить, що ЕРС, яка наводиться в провіднику при його переміщенні в магнітному полі, пропорційна магнітній індукції, довжині провідника та швидкості переміщення

$$e=BLv.$$

Перетинання ліній магнітного поля провідниками обмотки в машині постійного струму відбувається практично під прямим кутом, тому в формулі відсутній синус кута атаки. Напрямок ЕРС визначається правилом правої руки («ГП» – генератор, права). Магнітні силові лінії повинні входити в долоню, великий відставлений палець вказує напрям руху, тоді витягнуті пальці правої руки вказують напрям ЕРС в провіднику. Напрямок магнітних силових ліній приймається таким чином, щоб вони виходили із північного магнітного полюса і входили в південний. Позначення полюсів загальноприйняте: N – північний, S – південний. Напрямок ЕРС позначається знаком «+» (мінус), якщо вона спрямована від нас, і «•» (точка) – якщо до нас. Якщо кінці провідника, в якому наведена ЕРС, з'єднати, то по ньому буде проходити струм, напрям якого збігається з напрямом ЕРС. У зовнішньому колі струм тече від позитивної клеми до негативної, а в середині джерела ЕРС (в обмотці якоря генератора) – навпаки.

При протіканні струму в провіднику, розташованому в магнітному полі, на провідник діє сила, згідно із законом Ампера, і її величина пропорційна магнітній індукції, довжині провідника і величині струму в провіднику

$$f=Blia.$$

Напрямок дії сили визначається правилом лівої руки («ДЛ» – двигун, ліва) магнітні лінії проникають в долоню, витягнуті пальці показують напрям струму, великий відставлений палець

вказе напрям дії сили. У генератора сила є гальмівною, у двигуна – є причиною руху якоря, створює руховий момент. Провідники в машині постійного струму входять до складу обмотки якоря, яка при роботі машини обертається в магнітному полі електромагнітів постійного струму чи головних полюсів.

Елементарна машина постійного струму має обмотку, яка становить один виток, а кінці його приєднуються до напівкілець. Із цих напівкілець здійснюється струмознімання за допомогою повзункових контактів. При оберті витка в магнітному полі на 180° здійснюється зміна полярності напівкілець, а полярність на щітках (у зовнішньому колі) залишається без зміни. Прилад випрямлення являє собою електромеханічний випрямляч чи колектор, який має сегменти (у наведеному прикладі – напівкілець), до яких приєднуються витки обмотки якоря. По мірі переміщення витків обмотки в магнітному полі полярність виводів у зовнішнє коло буде залишатись завдяки випрямлючій дії колектора. Таким чином, в обмотці якоря МПС протікає змінний струм, а в зовнішньому колі – постійний з пульсаціями, викликаними випрямлюючою властивістю колектора. Пульсації звичайно малі і складають десяті частки відсотка. Елементарна МПС зображена на рисунку 1.1.

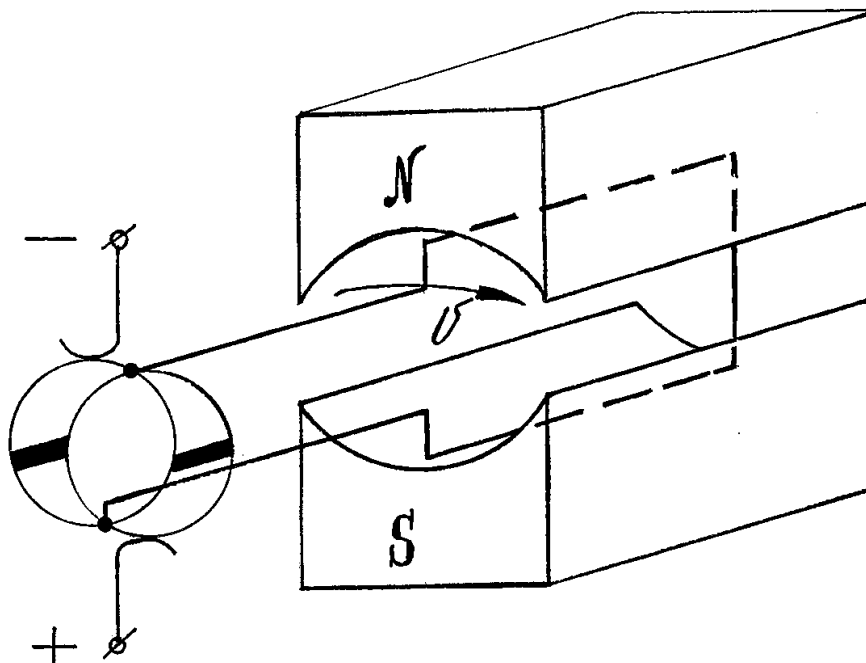


Рисунок 1.1 - Машина постійного струму

Форма ЕРС елементарної МПС матиме вигляд, зображений на рисунку 1.2.

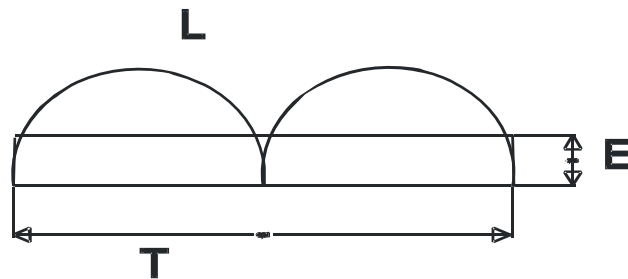


Рисунок 1.2 - ЕРС у зовнішньому колі елементарної МПС

Середнє значення ЕРС знаходиться як

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T e dt \cdot$$

Важливим параметром МПС є полюсне ділення, яке являє собою довжину дуги геометричного кола якоря, на один полюс

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

де D – зовнішній діаметр якоря;
 p – кількість пар полюсів МПС.

Лінія струмоznімання з колектора повинна проходити через центр якоря строго посередині між головними полюсами. Ця лінія має назву геометричної нейтралі і на ній розташовують щітки. Відстань між щітками визначається величиною полюсного ділення, приведеною до діаметра колектора.

1.2 Магнітне коло машини постійного струму

Для використання закону електромагнітної індукції в одержаній ЕРС необхідно створити в МПС магнітний потік. Для проведення магнітного потоку формується магнітне коло. Магнітне коло об'єднує активні і конструктивні вузли і має складну форму. Приклад магнітного кола зображений на рисунку 1.3.

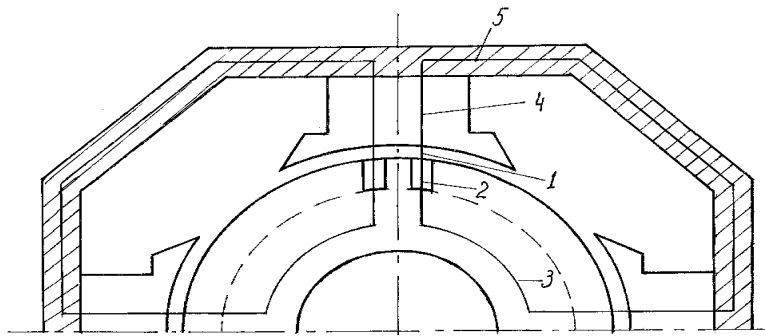


Рисунок 1.3 - Конструктивний вигляд магнітного кола МПС

Для створення магнітного потоку застосовується електромагнітне збудження головних полюсів. Існують машини невеликої потужності з постійними магнітами. Для розрахунку (вибору) обмотки збудження виконується розрахунок магнітного кола, який дозволяє визначити МПС обмотки збудження. Магнітне коло повинне бути сконструйоване таким чином, щоб при заданій МПС обмотки збудження одержати максимальний магнітний потік в зоні розташування обмотки якоря або у повітряному зазорі між якорем і полюсом. Тривалою практикою побудови МПС визначені оптимальні форми магнітного кола і завдання конструктора в тому, щоб реалізувати їх в конкретному випадку. В основі розрахунку магнітного кола лежить закон повного струму

$$\oint \bar{H} d\bar{l} = F_0.$$

Проте складність форми магнітного кола не дозволяє прямого розв'язання задачі за законом повного струму. Магнітопровід прийнято розбивати на п'ять ділянок. Кожна

ділянка має приблизно однакову площу поперечного перерізу і однакову магнітну індукцію. Де це не досягається, приймають середнє значення магнітної індукції, як в зубцях якоря. Напрямок контура інтегрування вибирається вздовж магнітної силової лінії, що дозволяє виключити векторне множення. Після таких спрощень інтеграл закону повного струму замінюється сумою п'ять складових МРС, пронумерованих на рисунку 1.3,

$$F_0 = F_\sigma + F_z + F_a + F_m + F_j.$$

Сюди відносяться МРС ділянки:

- 1 – F_σ – повітряного зазора;
- 2 – F_z – зубців осердя якоря;
- 3 – F_a – спинки осердя якоря;
- 4 – F_m – осердя головного полюса;
- 5 – F_j – станини або ярма.

Схема розрахунку магнітного кола така:

- за заданими геометричними розмірами визначаються площі поперечного перерізу і довжини ділянок магнітного кола;
- за відомим магнітним потоком визначаються магнітні індукції в ділянках магнітного кола як

$$B = \Phi / S,$$

де Φ – величина магнітного потоку;
 S – площа поперечного перерізу.

- визначається напруженість магнітного поля в кожній ділянці:

1) для першої ділянки повітряного зазора

$$H_\sigma = B_\sigma / \mu_0,$$

де μ_0 – питома магнітна проникність повітря;

2) для інших ділянок напруженість знаходиться за кривими намагнічування, які задані для кожної марки сталі;

– визначається МРС, необхідна для проведення потоку через кожну ділянку, як

$$F=HL,$$

де L – довжина магнітної силової лінії в ділянці магнітного кола;

– визначається загальна МРС за сумою МРС усіх ділянок.

Розрахунки виконують для декількох значень магнітного потоку, а за одержаними результатами креслять основну криву намагнічування МПС, якою є залежність $\Phi = f(F_0)$. Звичайно розраховують криву намагнічування для значень потоку в частках номінального: 0,5; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2.

Розрахунок МРС у ділянках має свої особливості.

У ділянці повітряного зазора форма магнітної індукції «розмита» на границях площі ділянки. Форма поля приводиться до прямокутної вибором розрахункових ширини (ϵ_i) та довжини (ℓ_i) ділянки як

$$\epsilon_i \approx \epsilon_p + 2\sigma; \quad \ell_i = \frac{\ell_m + \ell_a}{2},$$

де ϵ_p – полюсна дуга;

σ – довжина повітряного зазора;

ℓ_m, ℓ_a – довжина осердя полюса та якоря.

Якщо повітряний зазор ексцентричний, то $\epsilon_i \approx \epsilon_p$. Полюсну дугу прийнято визначати через коефіцієнт полюсного перекриття $\epsilon_p = \alpha\tau$ або $\epsilon_i = \alpha_i\tau$.

Розрахункова довжина повітряного зазора більша його геометричного розміру. Якір має зубчасту структуру і магнітні силові лінії стягуються до зубців. Середня довжина магнітної

силової лінії дорівнює розрахунковій довжині повітряного зазору і визначається збільшенням довжини і шляхом множення на коефіцієнт Картера.

$$K_{\sigma} \cong \frac{t_{z_1} + 10\sigma}{e_{z_1} + 10\sigma},$$

в якому t_{z_1} – ширина зубцевого ділення; e_{z_1} – ширина зубця на поверхні якоря. Величина K_{σ} звичайно дорівнює від 1,1 до 1,2.

Найбільш складною для розрахунку є ділянка зубців якоря. Для технологічності виготовлення обмотки якоря пази виконуються однакової ширини, тоді зубці за висотою паза мають різну ширину, різну площу поперечного перерізу і різне значення магнітної індукції.

Як правило, розрахунок виконують для трьох перерізів зубця: біля дна паза, посередині його висоти і біля поверхні якоря. За кривими намагнічування знаходять $H_{z_3}, H_{z_2}, H_{z_1}$, їх осереднюють за формулою Самсона

$$H_z = \frac{H_{z_1} + 4H_{z_2} + H_{z_3}}{6}.$$

При значеннях магнітної індукції більш ніж 1,8 Тл необхідно враховувати явище проникнення магнітного потоку в немагнітні шари паза з допомогою зубцевих коефіцієнтів

$$K_{z_{1,2,3}} = \frac{t_{z_{1,2,3}}}{e_{z_{1,2,3}} \cdot l_a \cdot K_{\sigma}},$$

де K_{σ} – коефіцієнт заповнення осердя якоря сталлю (без товщини лакових плівок та нещільностей прилягання листів шихтованого пакета). Звичайно $K_{\sigma} \approx 0,93 - 0,95$ при товщині листів 0,5 мм.

У ділянці спинки якоря магнітний потік роздвоюється, тому магнітна індукція визначається діленням магнітного потоку на подвоєну площу поперечного перерізу.

У ділянках осердя полюса та в станині магнітний потік збільшується на величину потоків розсіювання, які проходять

між полюсами мимо якоря. Це явище враховується коефіцієнтом розсіювання

$$\sigma = (\Phi + \Phi_{\sigma}) / \Phi,$$

де Φ_{σ} – магнітний потік розсіювання; звичайно $\sigma \approx 1,15 \div 1,25$.

У ділянці станини магнітний потік роздвоюється, як і в якорі, тому магнітна індукція визначається як

$$B_j = \sigma_{\Phi} / (2S_j),$$

де S_j – площа поперечного перерізу станини.

За розрахованою основною кривою намагнічування можна знайти МРС, необхідну для проведення магнітного потоку через повітряний зазор та через феромагнітні ділянки. Частка МРС повітряного зазора в загальній МРС збудження визначається коефіцієнтом намагнічування машини

$$K_{\mu} = F_0 / F_{\delta},$$

де F_0 – загальна МРС обмотки збудження (звичайно при номінальній ЕРС);

F_{δ} – МРС повітряного зазора.

Характерна основна крива намагнічування МПС показана на рисунку 1.4.

Довжина піддотичної визначає МРС повітряного зазора, внаслідок цього

$$K_{\mu} = 1 / F_{\delta}^*, \quad F_{\delta}^* = F_{\delta} / F_{0H}.$$

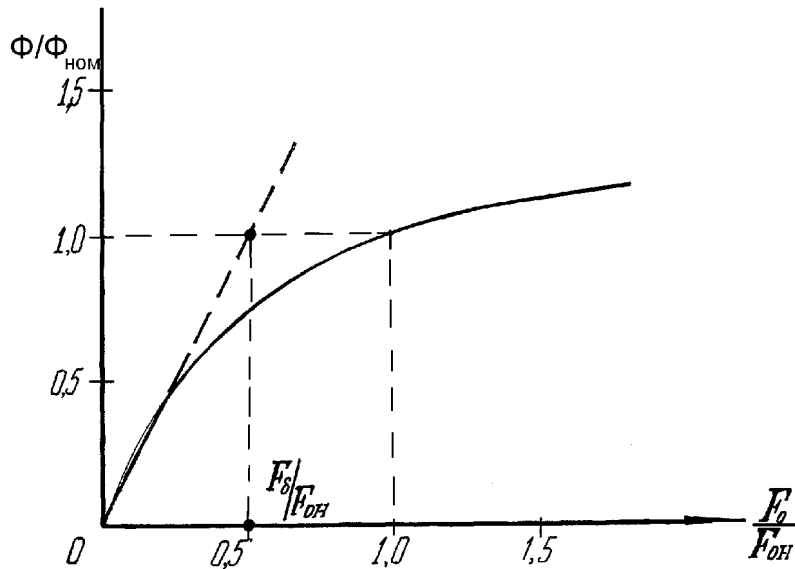


Рисунок 1.4 - Крива намагнічування МПС

«Зірочкою» позначені відносні величини. Величина K_μ здебільшого дорівнює від 1,3 до 1,7.

При оптимальному проектуванні магнітного кола магнітні індукції в ділянках знаходяться на рівнях: $B_\delta \approx 0,8 - 1,1 \text{ Тл}$; $B_{z_3} = 2,2 \div 2,4 \text{ Тл}$; $B_a = 1,4 \div 1,65 \text{ Тл}$; $B_m = 1,4 \div 1,7 \text{ Тл}$; $B_j = 1,2 \div 1,4 \text{ Тл}$.

У швидкісних машинах, де частота перемагнічування осердя якоря сягає 50 Гц і більше, магнітні індукції мають менші значення, в тихохідних – більші. Головними ділянками, де магнітний потік одержує найбільший опір при проходженні по магнітному колу, є ділянки повітряного зазора та зубців якоря. Тому їх треба проектувати і розраховувати вельми ретельно.

1.3 Обмотки якорів машин постійного струму

Обмотки якорів МПС призначені для наведення ЕРС і проходження силового струму.

Обмотка визначає потужність машини і до неї прикладається силова дія струму, що дає електромагнітний момент. Основні вимоги до обмоток такі:

- розвивати необхідну ЕРС;
- бути механічно та термічно міцними;
- мати хороші комутаційні властивості.

Конструктивно обмотки виготовляються по-різному залежно від величини струму, типу обмотки та значення напруги. Вони бувають шаблонними, виготовленими із шаблонних катушок, та м'якими для безпосередньої намотки на яркі. Шаблонні обмотки укладаються у відкриті (рідко в напівзакриті) пази, м'які – в закриті пази (рисунок 1.5).

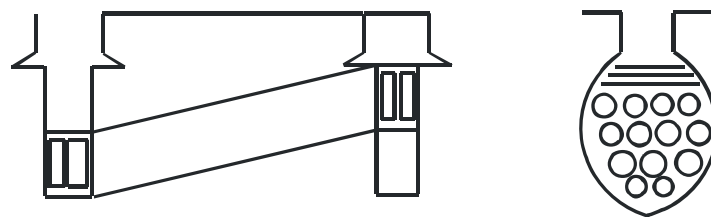
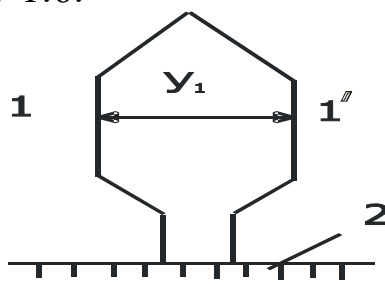


Рисунок 1.5 - Види обмоток якоря МПС

Елементами обмотки якоря є:

- виток – частина обмотки, яка має два активних провідники (сторони);
- секція – частина обмотки, яка приєднується до двох колекторних пластин згідно з електричною схемою обмотки;
- катушка – група секцій, яка має загальну для них ізоляцію від корпусу машини.

Характерний вигляд витка петльової обмотки якоря показаний на рисунку 1.6.



1,1' – сторони (активні провідники) витка; 2 – колектор;

$y_1 \approx \tau$ – крок обмотки

Рисунок 1.6 - Виток обмотки якоря

Реальні пази ділять на елементарні, в яких розміщується по ширині тільки одна секція та на кожний елементарний паз приходиться одна колекторна пластина. Укладання обмотки в пази якоря виконується згідно з кроками обмотки. Розрахунковими є кроки, вимірювані в елементарних пазах:

- перший частковий крок (y_1) – відстань між сторонами однієї секції;
- другий частковий крок (y_2) – відстань між другою активною стороною другої секції та другою активною стороною першої секції;
- результуючий (або крок по колектору) – відстань між початками приєднання до колектора сусідніх по ходу обмотки секцій.

Згідно з визначенням, кількість елементарних пазів (Z_e) дорівнює кількості колекторних пластин (K) за винятком хвильових обмоток з «мертвими» секціями.

Розміщення обмотки в пазах якоря виконується згідно з монтажним кроком або кроком по пазах, який знаходиться діленням y_1 на кількість елементарних пазів в одному реальному

$$y_z = y_1 / U_n .$$

Крок по пазах буває цілим та дробним. В останньому випадку обмотка називається ступінчатою і потребує паяння з боку протилежного колектору.

Обмотки якорів мають багато різновидностей або типів. Тип обмотки визначається кількістю паралельних гілок, які вона створює по відношенню до зовнішнього струмоznімання через повзунковий контакт колектора. Обмотки бувають петльовими, хвильовими та комбінованими («жаб'ячими»). Крім того, обмотки бувають простими та складними, які мають в своєму

складі декілька простих обмоток. Кількість паралельних гілок призначається $2a$, кількість полюсів $2p$. Типи обмоток показані на рисунку 1.7.

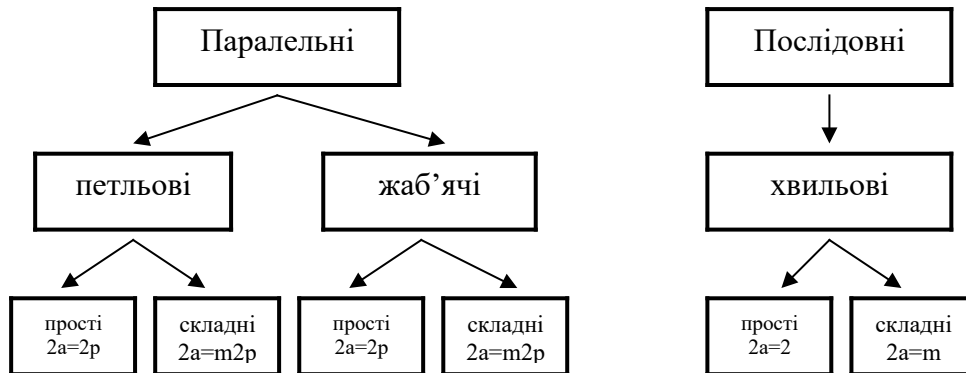


Рисунок 1.7 - Типи обмоток якорів МПС

Тут m – кількість ходів обмотки. Для паралельних обмоток m звичайно не більше 2, однак декілька машин побудовані з петльовими обмотками, які мають $m=3$.

Зовнішній струмопідвід виконується електрощітками, котрі встановлюються на лініях геометричної нейтралі. Кількість місць струмопідводу дорівнює кількості полюсів. Виняток може бути в машинах з хвильовими обмотками, де може встановлюватись два струмопідводи незалежно від $2p$, якщо це не приводить до збільшення довжини колектора.

Електрична схема петльової обмотки подана на рисунку 1.8. Дані обмотки такі:

$$Z=69; U_n = 3; K=207; 2p=6; 2a=6; y_1 = 33; y_2 = 32; y=1; y_z = 11.$$

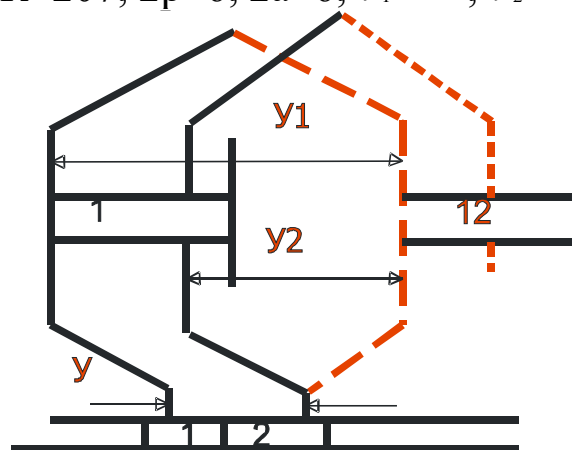


Рисунок 1.8 - Електрична схема простої петльової обмотки

Кількість паралельних гілок простої петльової обмотки така, як кількість полюсів. Кожна гілка розташована під одним полюсом. ЕРС, яка індукується в гілках обмотки, може відрізнятися за величиною, у зв'язку з різними значеннями повітряних зазорів під полюсами (неточність складання, прогинання вала, ексцентриситет підшипників). Різні значення повітряних зазорів призводять до різних магнітних потоків окремих полюсів, наслідком чого є різні значення ЕРС. Останнє викликає вирівнюючі струми в обмотці навіть без зовнішнього навантаження.

Для усунення цих струмів та їх негативних наслідків точки, які теоретично повинні мати однакові потенціали, з'єднують спеціальними провідниками або вирівнюючими з'єднаннями. У простих петльових обмотках застосовуються вирівнюючі з'єднання, які з'єднують колекторні пластини на відстані еквіпотенційного кроку $Y_p = K/P$. Ці з'єднання називають з'єднаннями першого роду.

Проста хвильова обмотка має тільки дві паралельні гілки і, згідно з законом неперервності ліній магнітного потоку, ЕРС у кожній гілці буде строго однакою. Хвильова обмотка не потребує вирівнювальних з'єднань.

Електрична схема простої хвильової обмотки подана на рисунку 1.9. Обмотувальні дані: $Z=37$; $U_n=3$; $K=111$; $2p=4$; $2a=2$; $y_1=27$; $y_2=28$; $y_z=9$.

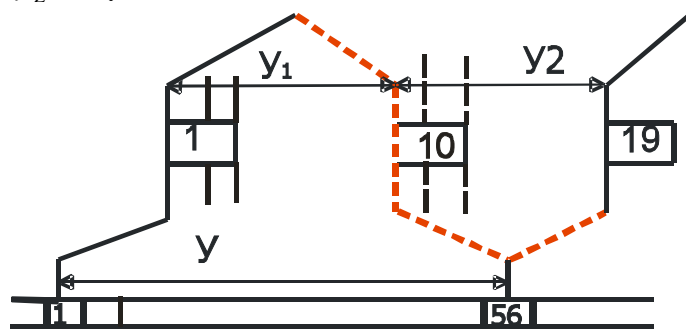


Рисунок 1.9 - Проста хвильова обмотка

Кроки петльової і хвильової обмоток розраховуються за формулами:

-петльова обмотка має $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon_k$ (ε_k – скорочення кроку;
 $y=1$; $y_2 = y_1 - y$; $y_z = \frac{y_1}{U_n}$);

-хвильова обмотка має $y = \frac{K \pm 1}{P}$; $y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon_k$; $y_2 = y - y_1$; $y_z = \frac{y_1}{U_n}$.

Якщо в простій хвильовій обмотці не одержується ціле число для кроку y , то з обмотки виключають одну чи дві секції. Їх не з'єднують з колектором і називають «мертвими». Робиться це в цілях уніфікації технологічної оснастки при виготовленні серійних машин. У таких обмотках $K \neq S$, де S – кількість секцій.

Складні обмотки складаються із декількох простих. Наприклад, складна петльова обмотка з даними: $Z=148$; $U_n=3$; $2p=8$; $2a=16$; $y_1=54$; $y_2=52$; $y_z=18$; $y=2$ має в своєму складі дві прості ($m=2$). Кроки такої обмотки розраховуються так само, як і для простої, тільки $y=2$ замість $y=1$. Електрична схема вказаної обмотки подана на рисунку 1.10.

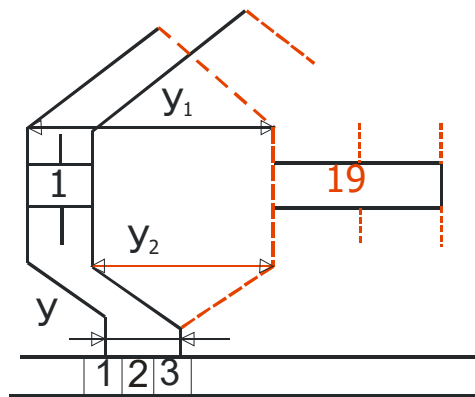


Рисунок 1.10 - Складна петльова обмотка

Складна хвильова обмотка показана на рисунку 1.11. Вона має дані: $Z=74$; $K=296$; $U_n=4$; $2p=6$; $2a=4$; $y = (k \pm m) / p$; $y_1=48$; $y_2=50$; $y_z=12$.

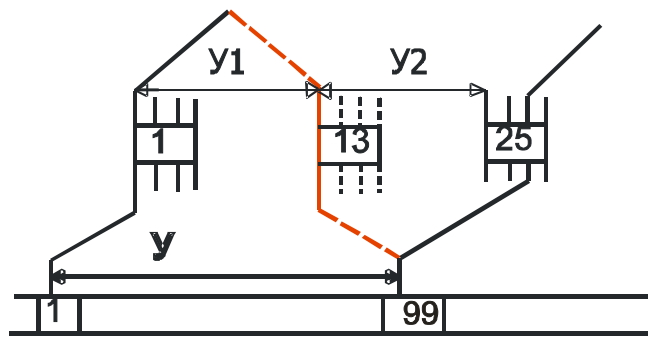


Рисунок 1.11 - Складна хвильова обмотка, $m=2$

Складні петльові та хвильові обмотки повинні мати однакове значення ЕРС у гілках простих обмоток, які утворюють складну обмотку.

Для ліквідації вирівнюючих струмів між простими обмотками точки однакового потенціалу з'єднують вирівнюючими з'єднаннями, які мають назву вирівнювачі другого роду. У петльових обмотках їх об'єднують в одну обмотку, яка виконує функції вирівнювачів першого і другого родів. Для цього крок вирівнювачів повинен бути непарним числом, що накладає деякі обмеження вибору обмотувальних даних. У складних хвильових обмотках екіпотенційні точки розташовані на відстані $y_p = k/a$. Кількість вирівнюючих з'єднань може бути повною, рівною кількості колекторних пластин, а частіше неповною, рівною кількості пазів якоря або іншою.

Існують паралельні обмотки, які не потребують вирівнюючих з'єднань. Вони бувають простими та складними і являють собою комбінацію петльової та хвильової обмоток. Вирівнювання потенціалів обмотки забезпечується електричною схемою самої обмотки (рисунок 1.12). Кроки петльової та хвильової обмоток мають зв'язок $y_{2n} = y_{2x}$; $y_n + y_x = k/p = y_p$.

Індекси «п» та «х» відповідають петльовій та хвильовій обмоткам.

Вибір типу обмотки робиться з врахуванням напруги між сусідніми колекторними пластинами, середня величина якої не повинна перевищувати 16-18 В. Вона визначається як

$$U_k = 2pU / K ,$$

де U – номінальна напруга машини.

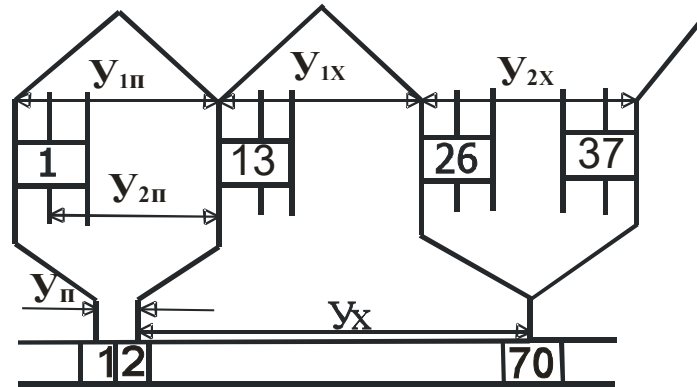


Рисунок 1.12 - «Жаб'яча» обмотка

У машинах малої потужності (до 1 кВт) U_k може досягати 35 В.

Другим фактором стосовно вибору обмотки є площа поперечного перерізу провідника обмотки якоря, яка звичайно не перевищує 50 мм^2 , а струм у провіднику – 300 А. Інколи допускають більші значення. Кількість полюсів машини постійного струму має деяку свободу вибору. Звичайно, максимальне значення полюсного ділення в найбільш потужних машинах не перевищує 60-70 см, а в машинах середньої потужності – 45 см. З огляду на вказані значення можна приймати кількість полюсів із врахуванням також довжини робочої поверхні колектора.

При обертанні якоря в магнітному полі головних полюсів в обмотці якоря наводиться ЕРС. Величина ЕРС обмотки дорівнює ЕРС паралельної гілки, в якій є $N/2a$ активних провідників (N – повна кількість активних провідників). ЕРС в одному провіднику визначається законом електромагнітної індукції

$$e = B_{\text{ср}} l_a v ,$$

а в усій обмотці визначається сумою ЕРС в провідниках паралельної гілки

$$E = l_a v \sum_1^{N/2a} B_{\alpha x},$$

бо

$$E = l_a v \left(\frac{N}{2a}\right) B,$$

де B – середнє значення магнітної індукції.

З урахуванням залежностей

$$B l_a = \Phi \quad ; \quad V = \pi D_a n / 60 = 2 p \pi n / 60$$

одержуємо кінцеву формулу для ЕРС обмотки якоря у вигляді

$$E = C_E \Phi n,$$

де $C_E = pN / 60a$ – постійний коефіцієнт;

Φ – магнітний потік;

n – частота обертання якоря, об/хв.

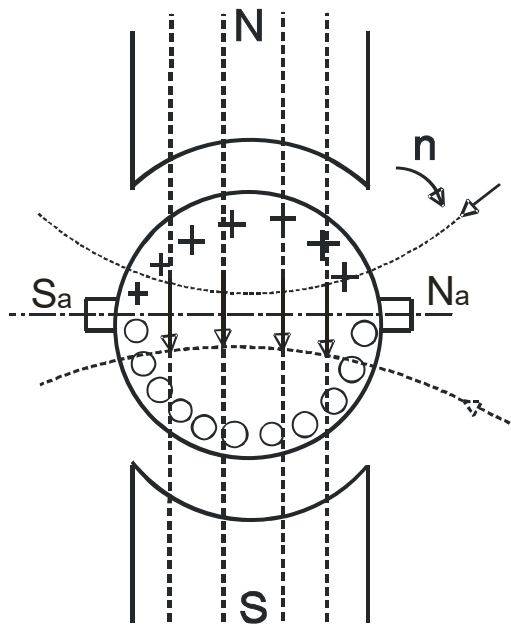
1.4 Реакція якоря в машинах постійного струму

При навантаженні МПС по обмотці якоря тече струм $i_a = J / 2a$. Він створює магнітне поле. Взаємодія магнітного поля якоря з магнітним полем головних полюсів називається реакцією якоря в МПС. Величина реакції залежить від інтенсивності питомого навантаження якоря, яка характеризується лінійним навантаженням. Останнє визначається кількістю ампер-провідників, які приходяться на одиницю довжини геометричного кола поверхні якоря, звичайно на 1 см,

$$AS = i_a N / (\pi D_a).$$

Значення AS досягає в потужних МПС 400-600 А/см, а МПС середньої потужності значення менші.

Якщо щітки встановлені на лінії геометричної нейтралі, то реакція якоря є поперечна. При цьому вісь магнітного поля якоря перпендикулярна осі магнітного поля головних полюсів. Дія поперечної реакції ілюструється рисунком 1.13.



N_a, S_a – умовні магнітні полюси поля якоря.

Рисунок 1.13 - Схема дії поперечної реакції якоря.

Під дією поперечної реакції якоря один край головного полюса підмагнічується, другий - розмагнічується. Підмагнічування йде в бік більшого насичення феромагнітних ділянок, тому магнітна індукція росте повільніше, ніж під другим краєм полюса, який під дією реакції якоря розмагнічується. У цьому явищі полягає вся суть дії поперечної реакції якоря. Дія поперечної реакції якоря, яку враховують у практиці, виявляється двома факторами:

- під навантаженням МПС зменшується магнітний потік;
- спотворюється форма магнітного поля в повітряному зазорі МПС.

При розгляді першого явища слід зауважити, що магнітний потік якоря йде паралельно з потоком головних полюсів в повітряному зазорі та зубцях якоря. У спинці якоря і полюсному наконечнику взаємодія двох потоків незначна і її не враховують. Магнітну характеристику ділянок, де взаємодіють два потоки головних полюсів та якоря, прийнято називати перехідною характеристикою МПС (рисунок 1.14) і визначати її у вигляді

залежності магнітної індукції у повітряному зазорі B_δ від МРС в повітряному зазорі та зубцях якоря, або

$$B_\delta = f(F_\delta + F_z).$$

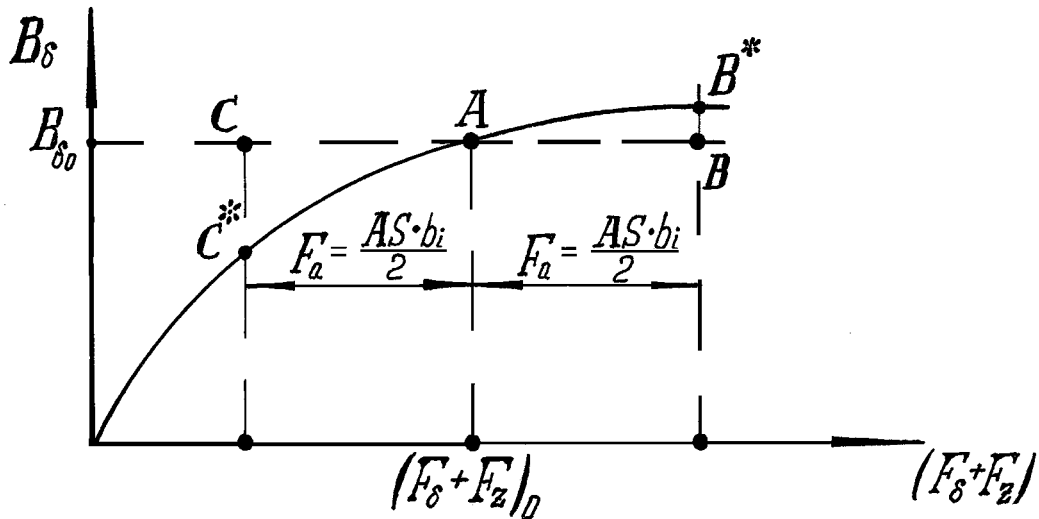


Рисунок 1.14 - Перехідна характеристика МПС

У режимі холостого ходу магнітний стан МПС характеризується значенням B_{δ_0} , якому відповідає $(F_\delta + F_z)_0$. При навантаженні один край полюса лінійно від центра полюса підмагнічується МРС якоря $F_a = AS \frac{b_i}{2}$, другий розмагнічується такою ж МРС. При підмагнічуванні магнітний потік збільшується на величину, пропорційну площі криволінійного трикутника ABV^* , а при розмагнічуванні зменшується пропорційно площі фігури ACC^* . Найбільше значення магнітної індукції в повітряному зазорі досягається в точці V^* , мінімальне – в C^* . Під дією поперечної реакції якоря завдяки нелінійним властивостям магнітопровода зменшується основний магнітний потік пропорційно різниці площ трикутників ACC^* та ABV^* . Для компенсації зменшення потоку збільшується МРС збудження до 15 % від F_{0H} . Найбільш небезпечним впливом на роботу машини може бути спотворення форми магнітної індукції у повітряному зазорі. У генераторів має місце ріст індукції під збігаючим краєм полюса, у двигунів навпаки – залежно від значення магнітної індукції росте напруга між суміжними колекторними пластинами, яка визначається залежністю

$$U_{K \max} = 2B_{\delta \max} \ell v .$$

Звичайно $U_{K \max} \leq 35(40)V$. При більших значеннях виникає небезпека електричного перекриття по колектору.

Для підвищення потенціальної стійкості МПС, коли $U_{K \max}$ досягає критичних значень чи перевищує їх, застосовують компенсаційну обмотку (рисунок 1.15).

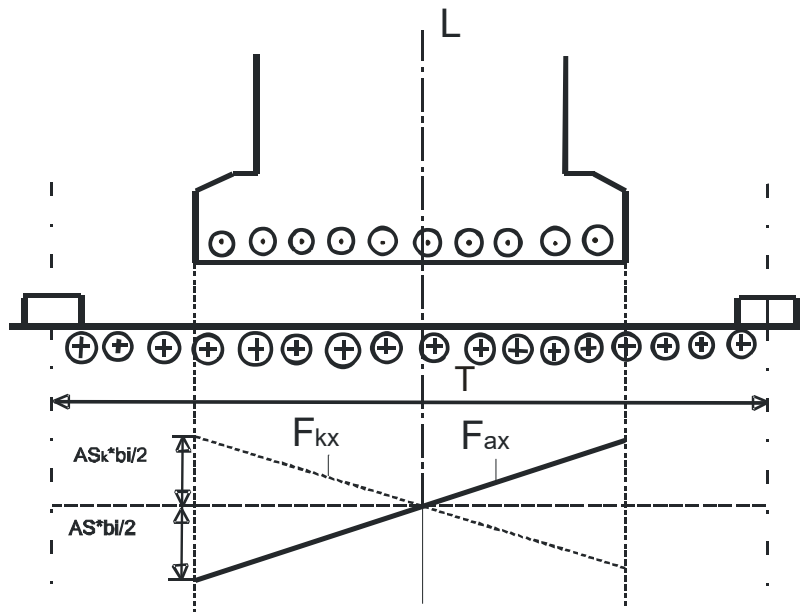


Рисунок 1.5 - Компенсаційна обмотка МПС

Компенсаційна обмотка розташовується в пазах полюсного наконечника і вмикається послідовно в електричне коло якоря. Значення лінійного навантаження компенсаційної обмотки повздовж полюсної дуги приблизно дорівнює лінійному навантаженню якоря. Напрямок струму в обмотці якоря під головним полюсом і в компенсаційній обмотці протилежні. Таким чином компенсується МРС поля якоря під полюсом. Тому зображення магнітного поля нема і нема додаткової напруженості потенціальних умов колектора. Майже всі потужні машини компенсовані. Компенсація поля якоря характеризується коефіцієнтом компенсації $k = AS_k / A_S$. Звичайно $k = 0.85 \div 1.1$.

При зміщенні щіток з геометричної нейтралі, крім

поперечної, виникає повздовжня реакція якоря. Залежно від напрямку зміщення вона може підмагнічувати, або розмагнічувати машину по осі головних полюсів. При зміщенні щіток по ходу обертання якоря у генератора виникає розмагнічуюча повздовжня реакція якоря, при зворотному зміщенні щіток – повздовжня підмагнічуюча реакція. У двигунів – навпаки. Напрямок дії повздовжньої реакції якоря Φ_d показаний на рисунку 1.16.

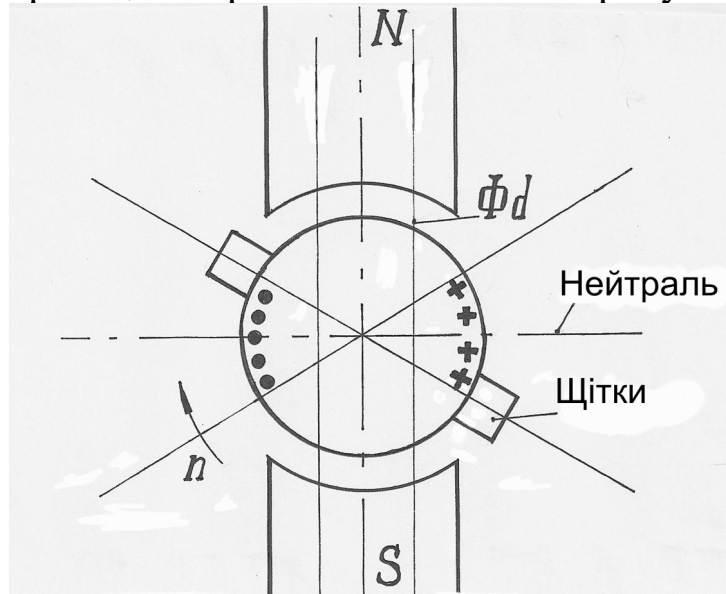


Рисунок 1.16 - Повздовжня реакція якоря в генераторі

1.5 Комутація машин постійного струму

При обертанні якоря повзунковий контакт щіток безперервно переводить секції обмотки якоря з однієї паралельної гілки обмотки якоря в іншу. Уся сукупність явищ при такому процесі називається комутацією МПС. У момент комутації секції перемкнуті щіткою. Час комутації залежить від ширини щітки та швидкості обертання якоря і це називається періодом комутації T . За період комутації в комутуючих секціях повинна здійснитися зміна напрямку струму. Загальна величина струму який змінюється за період комутації, дорівнює подвоєному значенню струму паралельної гілки. Комутація може супроводжуватись іскрінням щіток, яке оцінюється візуально в балах. Кількість балів, або класи комутації бувають: 1 б – безіскрова комутація; 1 1/4 б – слабе точкове іскріння; 1 1/2 б –

слабке іскріння, яке призводить до появи слідів непрогресуючого підпалення; 2 б – сильне іскріння, яке допускається короткочасно в перевантажувальних режимах. Існує і більш інтенсивне іскріння, яке взагалі не допускається в робочих режимах МПС.

Іскріння має причини електромагнітного характеру. Секції обмотки якоря вкладаються у феромагнітні пази осердя обмотки якоря. Коли в секціях протікає струм, то є магнітне поле, яке створюється цим струмом, як власне, так і взаємне. Комутуючі секції розташовані в області геометричної нейтралі, де практично нема поля головних полюсів. Магнітне поле комутуючих секцій є полем розсіювання. При зміні напрямку струму в комутуючих секціях виникає ЕРС само- та взаємоіндукції, котра має назву реактивної ЕРС. Згідно з правилом Ленца, вона намагається протидіяти зміні напрямку струму або підтримує той струм, який був у секціях до початку комутації. Звідси витікає її назва – реактивна ЕРС. Уповільнення зміни струму призводить до того, що до завершення періоду комутації струм не встигає змінитися до необхідної величини струму паралельної гілки, в яку входить секція після комутації. Процес комутації завершується обривом нескомутованого струму, що є причиною іскріння. Комутуючі секції показані на рисунку 1.17, а на рисунку 1.18 показана зміна струму при оптимальній безіскровій комутації.

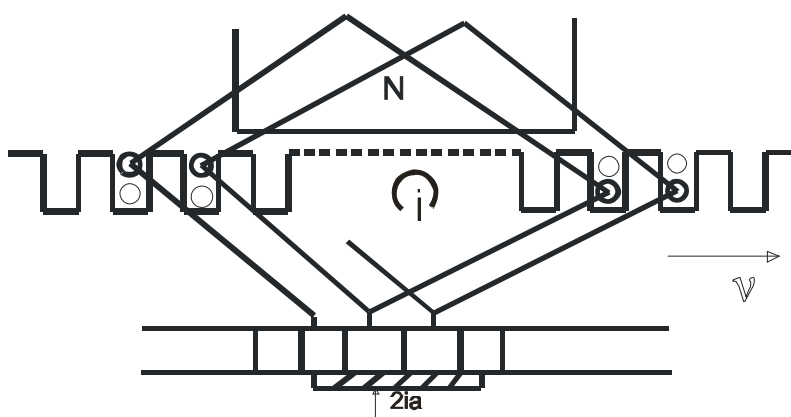


Рисунок 1.17 - Комутуючі секції

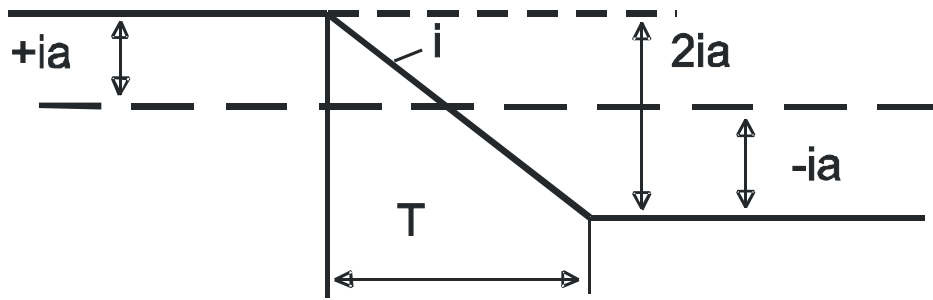


Рисунок 1.18 - Зміна струму в секціях МПС при ідеальній комутації

Величина реактивної ЕРС визначається законом електромагнітної індукції

$$e_s = -\partial\Psi_s / dt ,$$

де Ψ_s – сумарне потокозчеплення комутуючої секції.

Величина потокозчеплення Ψ_s пропорційна струму, оскільки комутуючі секції розташовані в зоні ненасиченого магнітного кола. Швидкість зміни потокозчеплення в середньому визначається величиною зворотного періоду комутації або пропорційна частоті обертання якоря. Середнє значення реактивної ЕРС визначається у вигляді

$$e_s = k\xi Jn ,$$

де ξ – магнітна провідність потоків розсіювання комутуючих секцій;

J – струм якоря;

n – частота обертання якоря;

k – коефіцієнт пропорційності.

Для забезпечення задовільної комутації в МПС застосовують допоміжні полюси, які створюють над зоною комутації комутуюче магнітне поле. При обертанні комутуючих секцій у цьому колі в них наводиться комутуюча ЕРС і зустрічно їй направлена. При такій комутації реактивної ЕРС вдається забезпечити оптимальні умови комутації –

$$e_s + e_k \approx 0,$$

де e_k – комутуюча ЕРС.

Для того, щоб ця умова виконувалась у різних режимах роботи МПС, необхідно, щоб комутуюче магнітне поле змінювалось пропорційно зміні струму якоря. Тому обмотку збудження допоміжних полюсів вмикають послідовно в коло якоря, а магнітне коло виконується ненасиченим. Тоді комутуюча ЕРС, згідно з законом електромагнітної індукції визначається у вигляді

$$e_n = 2\ell_a B_k v,$$

в якому значення магнітної індукції комутуючого поля пропорційно струму.

Тоді

$$e_k = cnJ,$$

де c – коефіцієнт пропорційності.

Схема розташування додаткових полюсів та їх полярність показані на рисунку 1.19.

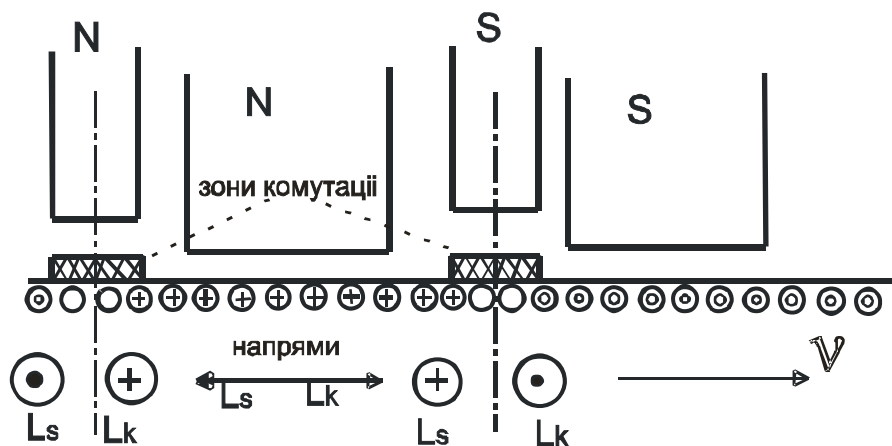


Рисунок 1.19 - Додаткові полюси в генераторі постійного струму

Полярність допоміжних полюсів повинна бути такою, щоб ℓ_k була зустрічна ℓ_s . Реактивна ЕРС підтримує струм, який був до початку комутації. Тоді в генератора за головним полюсом по напрямку обертання повинен бути розташований різнойменний допоміжний полюс (рисунок 1.19), у двигуна – навпаки. При таких уявних ідеальних умовах компенсації реактивної ЕРС повної компенсації в різних режимах досягти неможливо. Тому безіскрову комутацію можна забезпечити при значеннях реактивної ЕРС, які не перевищують 8 (10) В. Величина магнітної індукції комутуючого поля в номінальних режимах звичайно не перевищує 0,2 Тл, тобто в п'ять разів менша за індукцію головного поля.

При неповній компенсації або при перекомпенсації реактивної ЕРС комутація може бути уповільненою ($\ell_s > \ell_k$) або прискореною ($\ell_s < \ell_k$). В обох випадках може бути іскріння «збігаючого» краю щіток. Зміна струму при різних видах комутації показана на рисунку 1.20.

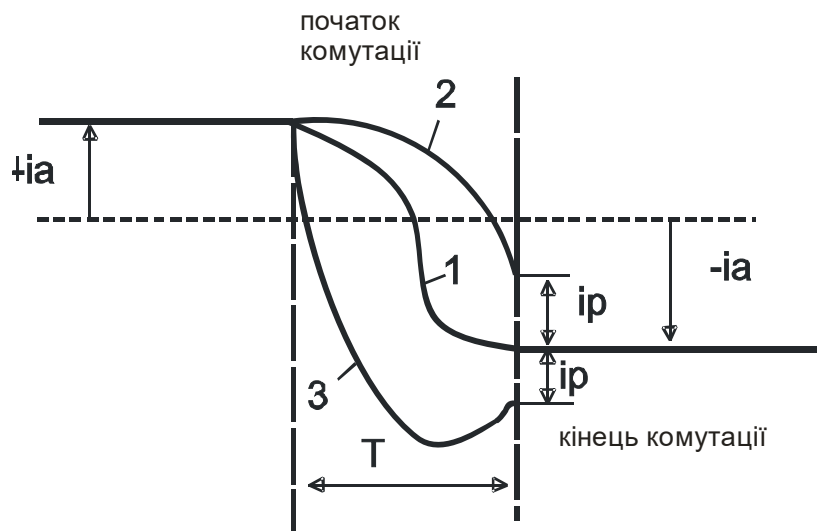


Рисунок 1.20 - Зміна струму при оптимальній (1), уповільненій (2) та прискореній (3) комутації МПС

Уповільнена та прискорена комутації завершуються обривом струму i_p , при оптимальній – $i_p = 0$.

Допоміжні полюси встановлюють на всіх МПС за виключенням машини малої потужності, у яких значення $\ell_s < 0.5B$.

Величина комутуючої ЕРС може настраюватись у МПС зміною величини магнітної індукції допоміжних полюсів. Для цього змінюють величину повітряного зазора під полюсами, що звичайно робиться на кожній МПС індивідуально.

2 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Типи генераторів

Тип генератора визначається системою збудження. Існують генератори:

- незалежного збудження;
- паралельного збудження, або шунтові генератори;
- змішаного збудження (компаундні та протикомпаундні).

Існують також генератори спеціального призначення, які мають більш складні системи збудження. Всі генератори об'єднує їх призначення – перетворювати механічну енергію первинного двигуна в електричну енергію постійного струму. Електричні схеми генераторів різних типів показані на рисунках 2.1 - 2.3.

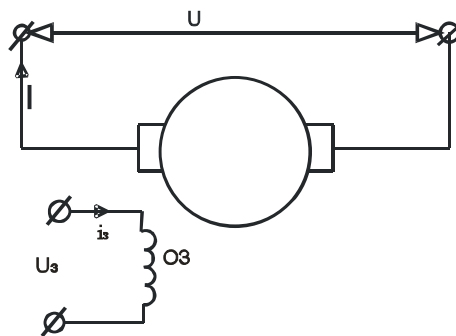


Рисунок 2.1 - Генератор незалежного збудження

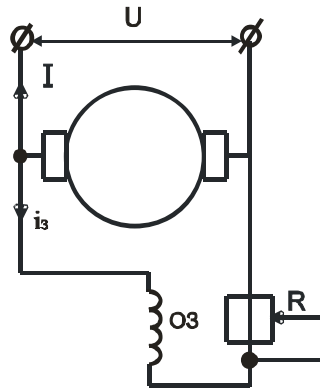


Рисунок 2.2 - Генератор паралельного збудження

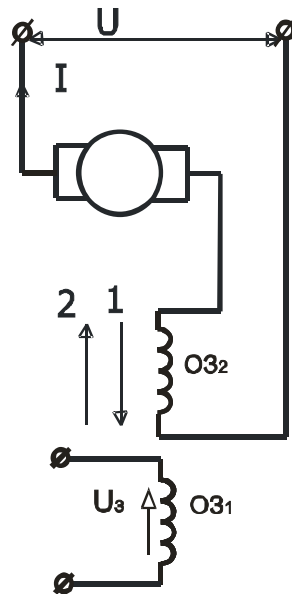


Рисунок 2.3 - Генератор змішаного збудження

У генераторі незалежного збудження обмотка збудження живиться від незалежного джерела струму з напругою U_B . Остання звичайно менша за напругу генератора. Потужність збудження складає 1-3 % від потужності генератора, а в крупних генераторах ще менше.

У шунтованих генераторах обмотка збудження вмикається на виводи генератора.

У компаундному генераторі є дві обмотки збудження – незалежна, або шунтова та послідовна. Остання ввімкнена в коло якоря і її МРС може збігатися з МРС другої обмотки (стрілка 2 на рисунку 2.3). У цьому випадку генератор має назву компаундного. Якщо МРС обмоток протилежні (стрілка 1 на

рисунку 2.3), то генератор протикомпаундний.

Режими роботи генератора визначаються його характеристиками:

– навантажувальними, які визначають залежність напруги генератора від струму збудження при незмінному струмі навантаження та при постійній частоті обертання –

$$U = f(i_s); J = \text{const}; n = \text{const}.$$

Винятком є характеристика холостого ходу при $J=0$;

– зовнішньою, або залежністю напруги генератора від струму навантаження при незмінних частоті обертання та струмі збудження –

$$U = f(J); n = \text{const}; i_s = \text{const}.$$

– регулюючою характеристикою, або залежністю струму збудження від струму навантаження при незмінній напрузі та частоті обертання –

$$i_s = f(J); U = \text{const}; n = \text{const}.$$

Винятком є характеристика короткого замикання при $U=0$, яка є залежністю

$$J_k = f(i_s).$$

2.2 Генератор незалежного збудження

Генератори незалежного збудження застосовуються як джерело напруги, яка регулюється, в крупних приводах постійного струму, а також в автономних приводах, наприклад в тягових тепловозах.

При регулюванні струму збудження генератора можна змінювати величину та полярність напруги на виході генератора. Ця залежність визначається навантажувальними характеристиками.

Якщо генератор не має навантаження, то визначається характеристика холостого ходу ХХХ – залежність $U = f(i_s)$, ХХХ є відображенням магнітної характеристики МПС, так як при $n = \text{const}$ напруга генератора практично збігається з ЕРС, яка пропорційна магнітному потоку.

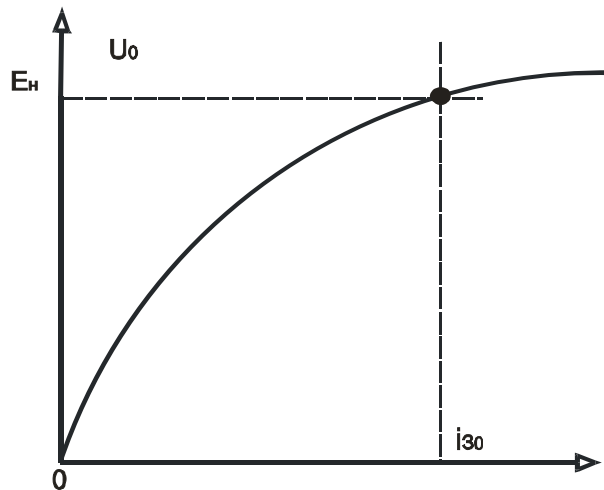


Рисунок 2.4 - Характеристика холостого ходу

ХХХ визначається розрахунком магнітного кола і знімається експериментально при зміні струму збудження зверху вниз. При відсутності струму збудження генератор дає невелику напругу, яка визначається магнітним потоком залишкового магнетизму. Це явище в названих генераторах не використовується. При навантаженні генератора напруга знижується в наслідок падіння напруги на опорах обмоток кола якоря генератора, у щітковому контакті, а також в наслідок розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря. Обидві причини зниження напруги в теорії зображують з допомогою характеристичного трикутника, катет ВС якого відображає падіння напруги в колі якоря, а катет АВ – розмагнічування реакцією якоря.

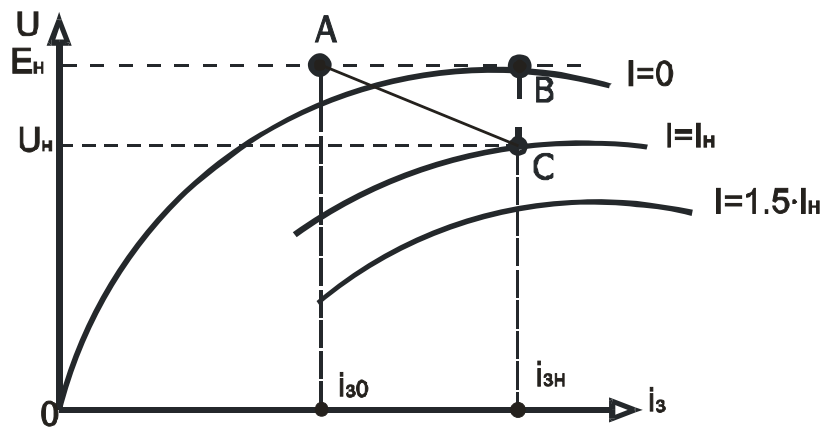


Рисунок 2.5 - Навантажувальні характеристики

Різниця струмів збудження i_{bn} і i_{b0} визначає ту величину МРС, яку слід додати в обмотку збудження, щоб компенсувати розмагнічувальну дію поперечної реакції якоря. Залежність між ЕРС генератора та напругою визначається з врахуванням загальної втрати напруги на опорах кола якоря, тобто

$$E = U + I(R_{я} + R_{\delta} + R_{k_0}) + 2\Delta U_{щ},$$

де $R_{я}, R_{\delta}, R_{k_0}$ – опори обмоток якоря, допоміжних полюсів компенсаційної обмотки;

$2\Delta U_{щ} = 2\delta$ – падіння напруги в щітках.

Навантажувальні характеристики дозволяють визначити інші характеристики генератора.

Зовнішня характеристика показує, що з ростом навантаження напруга генератора знижується за рахунок падіння напруги в колі якоря та розмагнічування поперечною реакцією якоря. При незмінній частоті обертання та незмінному струмі збудження – умовах визначення характеристики, вона має вигляд, як на рисунку 2.6.

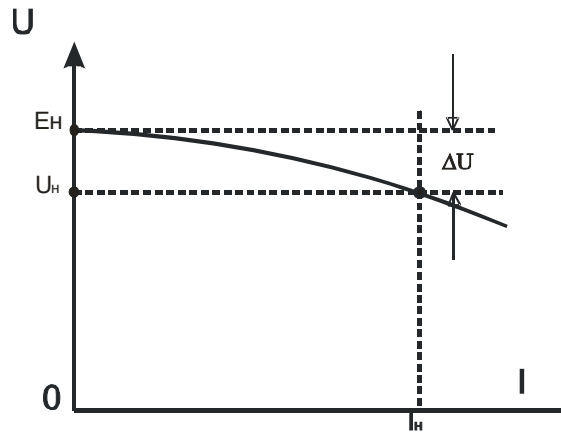


Рисунок 2.6 - Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження

Загальне падіння напруги ΔU звичайно невелике, близько $(4-6) \% \cdot U_n$, тому зовнішню характеристику називають жорсткою.

Регулювальна характеристика вказує, як потрібно регулювати струм збудження, щоб напруга генератора залишалась незмінною при різному струмі навантаження. Вигляд характеристики є наслідком зовнішньої характеристики.

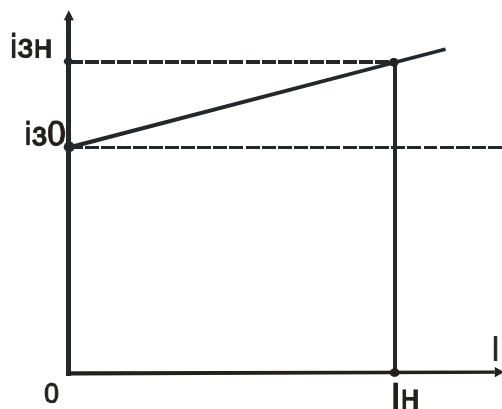


Рисунок 2.7 - Регулювальна характеристика генератора незалежного збудження

З розвитком автоматичних систем регулювання характеристика втратила своє первісне значення і практичного значення майже не має. Винятком характеристики є

характеристика короткого замикання, яка внаслідок малого магнітного потоку і ненасиченого магнітного кола має вигляд прямої лінії.

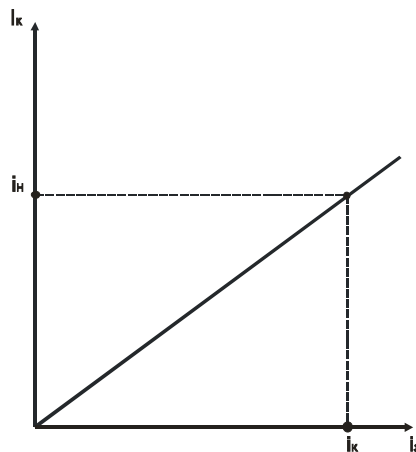


Рисунок 2.7 - Характеристика короткого замикання генератора незалежного збудження

2.3 Генератор паралельного збудження

Генератор паралельного збудження застосовується в установках середньої потужності в умовах, де немає інших джерел електроживлення. Основною перевагою генератора є здатність генерування ЕРС, без стороннього збудження генератор при виняткових умовах самозбуджується. Цих умов три: наявність залишкового магнетизму, полярність напруги від струму збудження повинна збігатися з полярністю від потоку залишкового магнетизму, опір кола збудження повинен бути менше критичного значення. Останню умову доцільно розглянути з допомогою ХХХ. Напруга, яка має місце на виводах якоря, прикладується до кола обмотки збудження. Унаслідок цього має місце рівняння

$$U = R_3 i_3 + L_3 di_3 / dt ,$$

перша складова в якому – падіння напруги на активному опорі, друга – індуктивне падіння. Процес самозбудження можливий тільки за умови, коли $U > R i_3$ або $L_3 di_3 / dt > 0$.

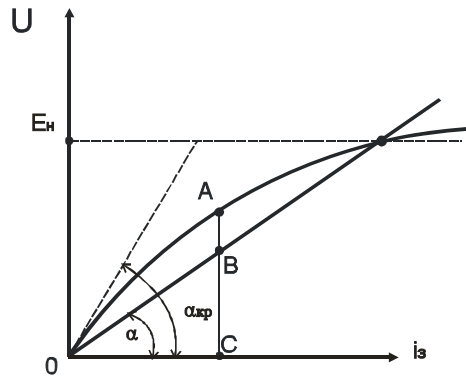


Рисунок 2.9 - Процес самозбудження генератора

На рисунку 2.9 показане збудження генератора. Відрізок ВС дорівнює активній втраті напруги, АВ – індуктивній. Тангенс кута α нахилу лінії активного падіння напруги ОВ пропорційний активному опору кола збудження. З ростом R_b кут α росте. При такому R_b , коли лінія активного падіння стане дотичною до ХХХ, самозбудження стане неможливим. Цей стан характеризується критичними значеннями $R_{кр}$ і $\alpha_{кр}$. У зв'язку з цим глибокого регулювання напруги генератор не має, звичайно $U_{\min} \approx 0.85U_n$.

Навантажувальні характеристики визначаються при незалежному збудженні і мають вигляд, показаний на рисунку 2.5. Зовнішня характеристика більш м'яка, ніж у генератора незалежного збудження. Вона визначається при $R_s = \text{const}$; $n = \text{const}$ (рисунок 2.10). При збільшенні навантаження, крім причин втрати напруги, які причетні до генератора незалежного збудження, виникає третя причина – зменшення струму збудження у зв'язку з падінням напруги з перших двох причин. При деякому значенні струму навантаження генератор втрачає збудження у зв'язку з порушенням третьої умови самозбудження, що слідує з навантажувальних характеристик, рисунок 2.11.

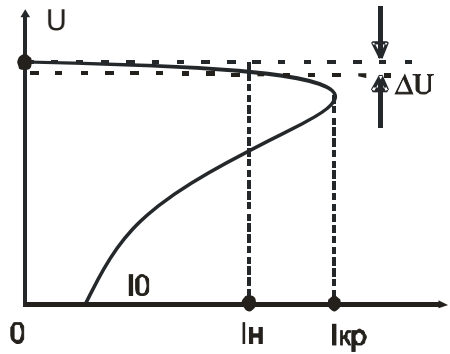


Рисунок 2.10 - Зовнішня характеристика шунтового генератора

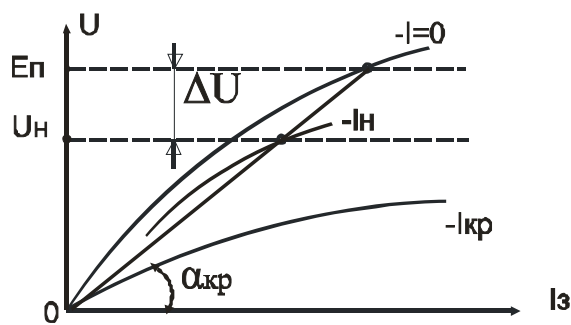


Рисунок 2.11 - Причина обмеження навантаження шунтового генератора

Значення $I_{кр}$ звичайно не повинно бути менше, ніж $1,5 I_n$. До значення $I_{кр}$ зовнішня характеристика є стійкою, при більших значеннях генератор втрачає навантаження і характеристика нестійка.

Регульовальна характеристика визначається за тих же умов, що у генератора незалежного збудження, і має подібний вигляд.

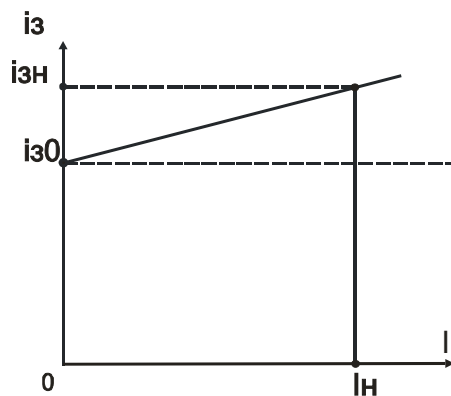


Рисунок 2.12 - Регульовальна характеристика шунтового

генератора

2.4 Генератор змінного збудження

Компаундні генератори – це генератори незмінної напруги. При зміні навантаження таких генераторів напруга практично не змінюється завдяки підмагнічувальній дії серієсної обмотки. Такі генератори знаходять застосування в спеціальних приводах, наприклад, для живлення гребних гвинтів на кораблях. У деяких приводах застосовуються генератори протикомпаундні, які останнім часом замінюються генераторами незалежного збудження разом з застосуванням напівпровідникових систем збудження. Ці системи дозволяють одержувати необхідні характеристики без ускладнення конструкції генератора.

Компаундні генератори здатні забезпечити завдяки належному вибору серієсної обмотки жорстку вихідну напругу з коливанням до $1\% \cdot U_n$ при навантаженні до I_n . Зовнішня характеристика такого генератора має вигляд, показаний на рисунку 2.13.

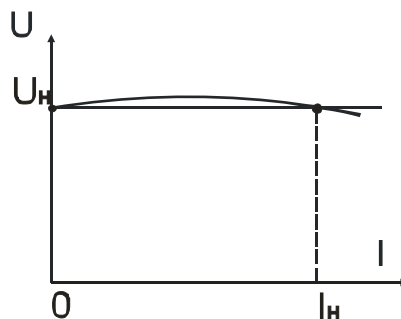


Рисунок 2.13 - Зовнішня характеристика компаундного генератора

Жорстка зовнішня характеристика визначає вигляд навантажувальних характеристик, які з ростом навантаження йдуть вище ХХХ.

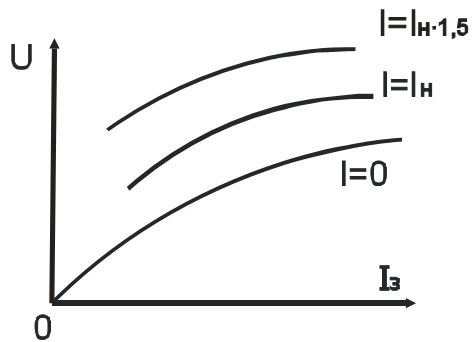


Рисунок 2.14 - Навантажувальні характеристики компаундного генератора

Регульовальна характеристика також жорстка, що слідує із зовнішньої характеристики.

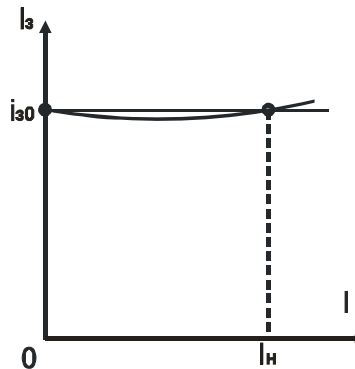


Рисунок 2.15 - Регульовальна характеристика компаундного генератора

Характеристика компаундного генератора, крім ХХХ, може змінюватись залежно від вибору серієсної обмотки. Наприклад, за допомогою трьох обмоток: незалежної, шунтової та протикомпаундної може бути одержана «ескаваторна» зовнішня характеристика, яка дозволяє обмежувати величину навантаження рівнем стопорного струму.

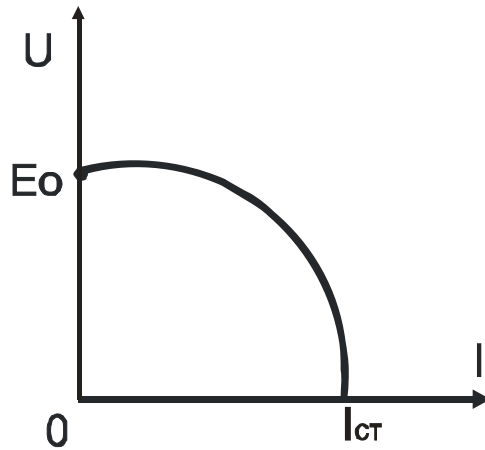


Рисунок 2.16 - Зовнішня характеристика проти компаундного генератора

3 Двигун постійного струму

3.1 Типи та характеристика двигунів

Залежно від системи збудження існують три основні типи двигунів постійного струму (ДПС):

- незалежного, або паралельного збудження;
- послідовного збудження (серієсний);
- компаундний.

Електричні схеми двигунів подано на рисунках 3.1 - 3.3.

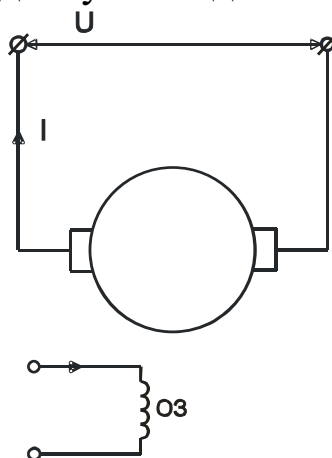


Рисунок 3.1 - Двигун незалежного збудження

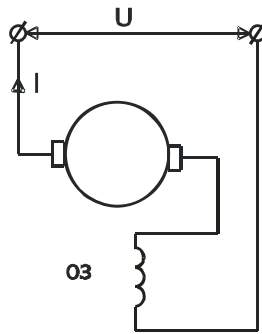


Рисунок 3.2 - Серієсний двигун

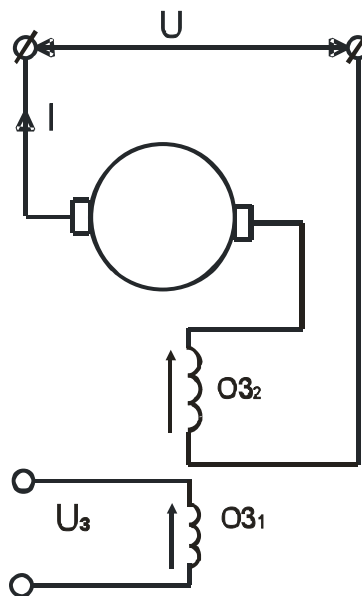


Рисунок 3.3 - Компаундний двигун

Якщо напруга двигуна та напруга збудження однакові, то обмотка збудження двигуна може живитися від спільної мережі. У цьому випадку двигун буде паралельного збудження. Однак це зовсім не принципово, тому що характеристики двигуна не змінюються.

У двигуні послідовного збудження струм збудження та струм навантаження однакові.

Комутаційний двигун має дві обмотки збудження незалежну та серієсну. МРС обох обмоток збігаються. Ступінь компаундування (частка МРС серієсної обмотки) може бути великою, наприклад МРС ОВ2 40 % і більше загальної МРС

збудження.

Машина постійного струму зворотні. Для переходу в режим двигуна належить змінити напрям струму по відношенню до ЕРС. У генераторі напрям струму та ЕРС збігаються

$$I = \frac{E - U}{R_a},$$

де R_a – опір обмоток генератора в колі якоря.

У двигуні

$$I = \frac{U - E}{R_a}.$$

Струм зовнішнього кола розтікається по паралельних гілках обмотки якоря. За законом Ампера на провідники обмотки діє сила в магнітному колі головних полюсів з індукцією B , рівна

$$f = B \ell_a i_a.$$

Сила f , прикладена до провідника зі струмом, створює елементарний електромагнітний момент $m = f D_a / 2$, або $m = f \cdot p \tau / \pi$. На всі провідники N буде діяти момент

$$M = \frac{p \tau}{\pi} \ell_a i_a \sum_1^N B_x.$$

З врахуванням залежності

$$\sum_1^N B_x = N \cdot B; \quad B \ell_a \tau = \Phi; \quad i_a = I / 2a$$

знаходимо

$$M = \frac{PN}{2\pi a} \Phi I,$$

або

$$M = C_m \Phi I ,$$

де $C_m = \frac{PN}{2\pi a}$ – постійний коефіцієнт;

Φ – робочий магнітний потік.

У двигунах момент є рухомим, а в генераторах гальмовим.
Основними характеристиками двигунів є:

швидкісні – $n=f(I)$;

моментна – $m=f(I)$;

ККД – $\eta=f(I)$.

Ця група характеристик визначається при $U=\text{const}$, $i_e = \text{const}$ (окрім серієсного двигуна) і має назву робочих характеристик. Інколи робочі характеристики визначають залежно від корисної потужності P_2 . Останні менш зручні в практичному використанні, тому що потужність є величиною розрахунковою, а струм можна безпосередньо виміряти. Крім робочих, двигуни характеризуються механічною характеристикою – залежністю $n=f(M)$ при $U=\text{const}$, $i_e = \text{const}$ (окрім серієсного двигуна).

Швидкісні та механічні характеристики бувають природними та штучними. Штучні характеристики одержують введенням в коло якоря додаткових опорів – R_d . Форма швидкісних характеристик визначається із рівняння рівноваги ЕРС в колі якоря

$$U = E + I(R_a + R_d) .$$

Із врахуванням залежності для ЕРС.

$$E = C_E \Phi n$$

маємо

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_d}{C_E \Phi} I ,$$

де R_a – додатковий опір (резистор) у колі якоря.

Моментна характеристика визначається формулою електромагнітного моменту.

Корисний момент M_2 визначається як:

$$M_2 = M - M_0,$$

де M_0 – момент обертання двигуна в режимі холостого ходу.

Механічні характеристики визначаються із швидкісних та моментної характеристик

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_d}{C \Phi^2} M,$$

де $C = C_E \cdot C_m$.

Характеристика ККД визначається при $R_d = 0$ і являє собою відношення корисної потужності на валу двигуна до повної, яка підводиться із мережі живлення. ККД визначається у відсотках

$$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100\%$$

або

$$\eta = (1 - \sum P / P_1) \cdot 100\%,$$

де $\sum P$ – загальні витрати потужності у двигуні.

Втрати потужності розділяють на дві частини – постійні, або втрати холостого ходу P_0 , які не залежать від струму навантаження, та змінні P_i – втрати в обмотках кола якоря, які залежать від струму. До постійних втрат відносяться механічні та сталі. Механічні втрати складаються із втрат у підшипниках, вентиляційних, від тертя щіток по колектору. Втрати в сталі виникають в осерді якоря при його обертанні в магнітному полі головних полюсів. Визначаються окремо втрати окремо в зубцях

та осерді. Втрати в сталі мають втрати від вихрових струмів та на гістерезис:

$$P_2 = \delta_2 \left(\frac{f}{100}\right) B^2; \quad P_{\text{ex}} = \delta_{\text{ex}} \left(\frac{f}{100}\right)^2 B^2.$$

Складна залежність загальних втрат від частоти перемагнічування враховується різними емпіричними формулами, які дають хороші практичні результати. Наприклад: для осердя та зубців втрати визначаються як

$$P_a = \frac{f(f+70)}{500} B_a^2 G_a; \quad P_z = \frac{f(f+30)}{350} B_{z2}^2 G_z,$$

де B_a, B_{z2} – магнітні індукції в якорі та посередині зубців (Т);
 G_a, G_z – маса осердя якоря та зубців (K_2); P_a та P_z у Ватах.

Змінні втрати – Джоулеві виділення потужності в опорах обмоток кола якоря та втрати в перехідному контакті щіток

$$P_i = I^2 (R_{\text{я}} + R_{\text{о}} + R_{\text{ко}} + R_{\text{з}}) + 2\Delta U_{\text{щ}} I,$$

де $R_{\text{я}}, R_{\text{о}}, R_{\text{ко}}, R_{\text{з}}$ – активні опори обмоток якоря допоміжних полюсів, компенсаційні та серієсні.

Коли постійні втрати дорівнюють змінним, ККД має найбільше значення. Досягається це при значеннях навантаження від 0,5 до 0,75 I_n . Тому ККД спочатку росте, а потім падає в залежності від навантаження.

3.2 Двигун паралельного збудження

Характеристика холостого ходу та навантажувальна характеристика визначаються в генераторному режимі роботи. ДПС паралельного збудження мають жорстку швидкісну та механічну характеристики. При зміні навантаження магнітний потік змінюється мало, особливо в компенсованих двигунах. Швидкісні характеристики двигунів мають вигляд, поданий на

рисунку 3.4. При розмагнічувальній дії реакції якоря в некомпенсованих двигунах частота обертання двигуна при перенавантаженнях може зростати.

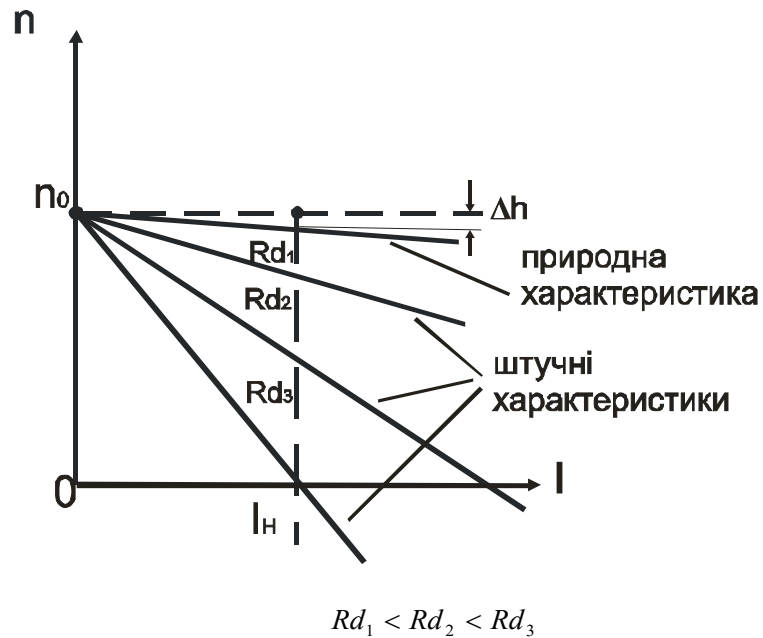


Рисунок 3.4 - Швидкісні характеристики двигуна незалежного збудження

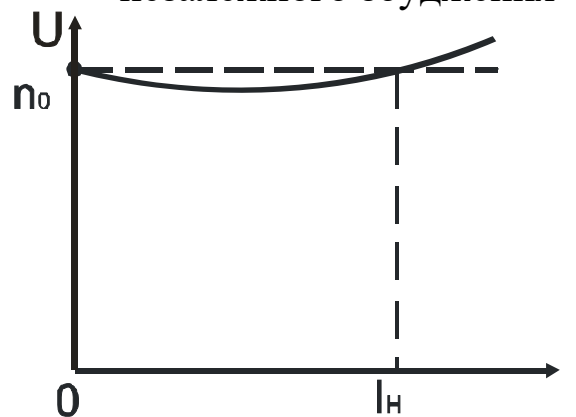


Рисунок 3.5 - Швидкісна характеристика некомпенсованого двигуна паралельного збудження

Моментна характеристика двигуна має вигляд прямої згідно з формулою моменту (рисунку 3.6).

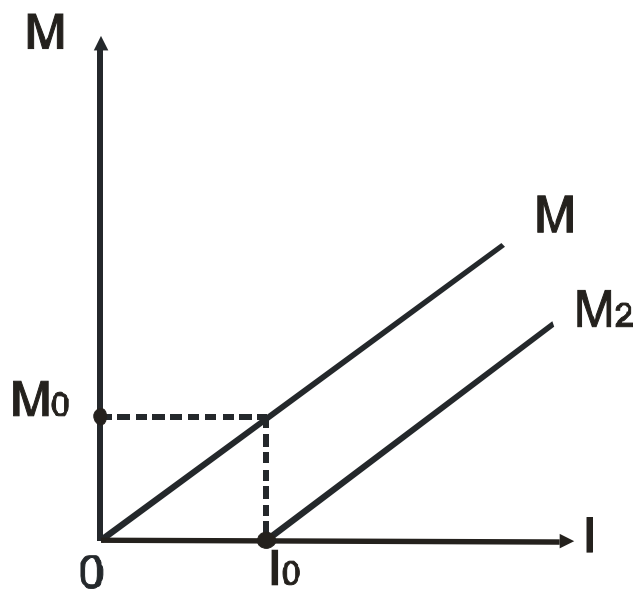


Рисунок 3.6 - Моментна характеристика двигуна паралельного збудження

Характеристика ККД з урахуванням зауважень щодо її вигляду подана на рисунку 3.7.

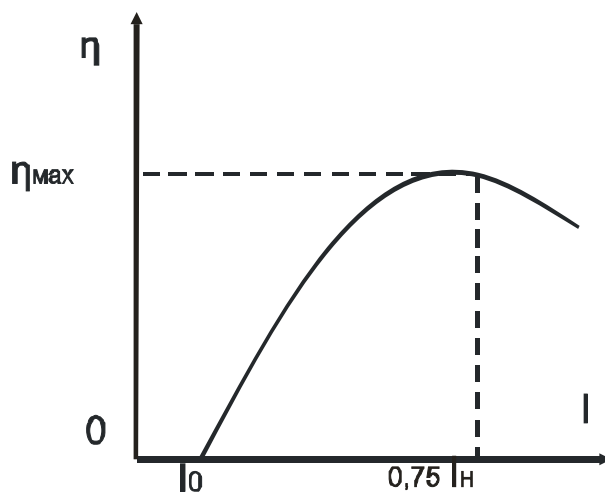


Рисунок 3.8 - Характеристика ККД двигуна паралельного збудження

Механічні характеристики подібні швидкісним.

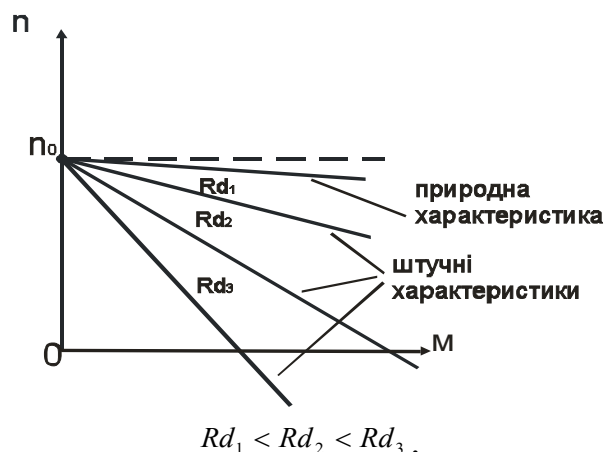
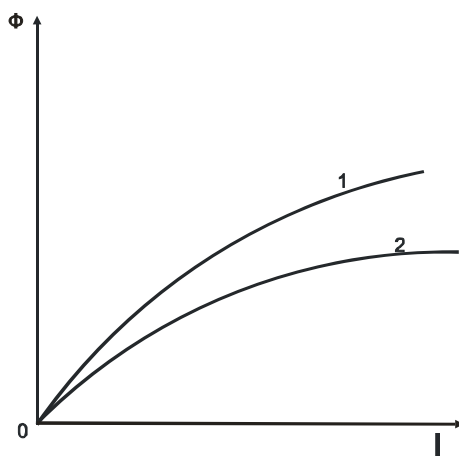


Рисунок 3.9 - Механічні характеристики двигуна незалежного збудження

При зменшенні магнітного потоку може відбуватися збільшення частоти обертання від розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря та з інших причин комутаційного характеру. Це явище інколи призводить до самовільного збільшення частоти обертання двигуна. Для запобігання цьому необхідно застосовувати швидкодіючі регулятори збудження.

3.3 Двигун послідовного збудження

Двигун послідовного збудження до сих пір залишається основним в тяговому приводі завдяки своїм характеристикам. Залежність магнітного потоку від струму навантаження, який одночасно з струмом збудження, подається однією навантажувальною характеристикою (рисунок 3.9).



1 – магнітна; 2 – навантажувальна

Рисунок 3.9 - Характеристики серієсного двигуна

Магнітна характеристика визначається експериментально при незалежному збудженні в генераторному режимі холостого ходу

$$\Phi = E / C_E n ,$$

де $E = U_{xx}$.

Навантажувальна характеристика визначається під навантаженням за умови $I_a = I_s = I$. Вона враховує падіння напруги в колі якоря та розмагнічувальну дію поперечної реакції якоря. В області ненасиченої магнітної системи двигуна магнітний потік змінюється практично пропорційно струму. У цьому зв'язку швидкісні характеристики мають гіперболічний вигляд (рисунок 3.10). При $\Phi \equiv I$

$$n = \frac{U}{C' I} - \frac{R_a + R_d}{C'}$$

де C' – постійний коефіцієнт.

При насиченій магнітній системі швидкісні характеристики визначаються по загальній формулі з врахуванням навантажувальної характеристики

$$n = \frac{U}{C_E I} - \frac{R_a + R_d}{C_E \Phi} I .$$

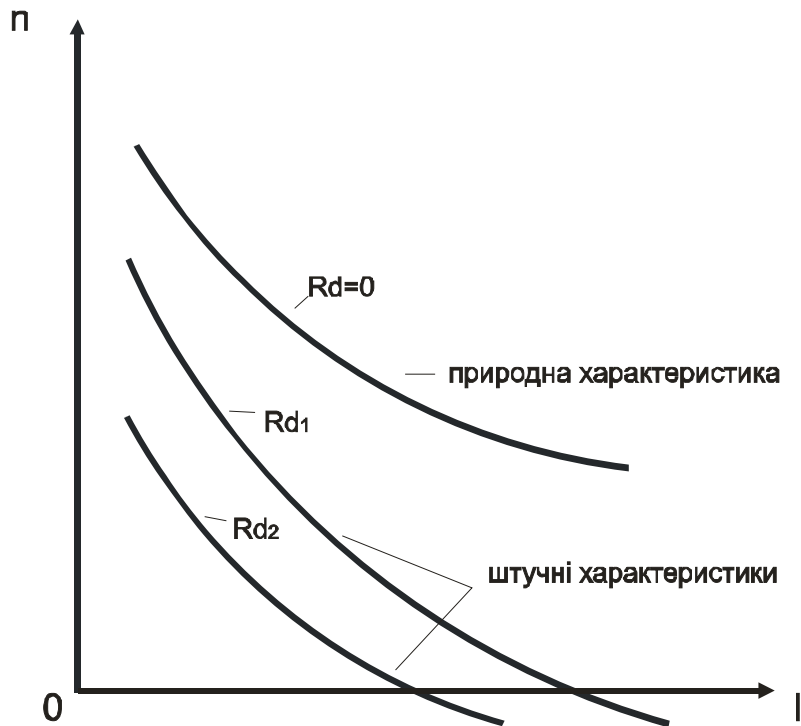


Рисунок 3.10 - Швидкісні характеристики серієсного двигуна

Серієсний двигун не може працювати без навантаження, оскільки в такому випадку він йде врознос. Його не можна вмикати в мережу в режимі ХХ.

Моментна характеристика, згідно з формулою, має вигляд параболи, якщо магнітопровід ненасичений, а далі визначається з врахуванням насичення за навантажувальною характеристикою (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 - Моментна характеристика серієсного двигуна

Характеристика ККД має звичайний для всіх двигунів вигляд. Однак поняття постійних втрат потужності в цьому двигуні умовне. При зміні струму змінюється як магнітний потік, так і частота перемагнічування осердя якоря (частота обертання). Втрати потужності в сталі осердя якоря залишаються практично постійними (рисунок 3.12).

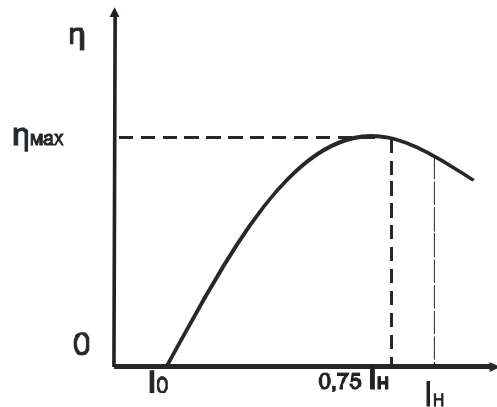


Рисунок 3.12 - Характеристика ККД серієсного двигуна

Механічні характеристики подібні швидкісним (рисунок 3.13).

$$n \cong \frac{U}{C' \sqrt{M}} - \frac{R_a + R_d}{C''},$$

де C' і C'' – постійні коефіцієнти.

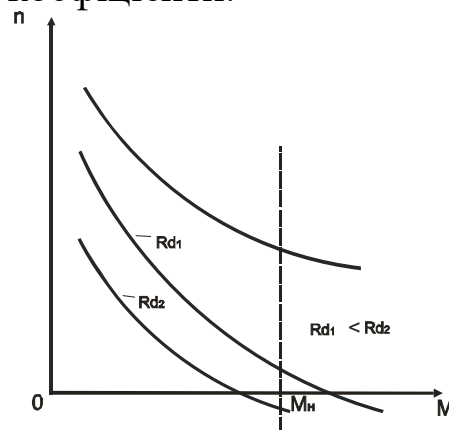


Рисунок 3.13 - Механічні характеристики серієсного двигуна

3.4 Компаундний двигун

Компаундні двигуни мають характеристики проміжні між характеристиками двигунів паралельного та послідовного збудження. Двигуни мають фіксовану частоту обертання в режимі холостого ходу, яка визначається магнітним потоком паралельної обмотки збудження. Характеристики швидкісні та механічні м'які в наслідок впливу серієсної обмотки збудження. Магнітний потік компаундного двигуна можна подати двома складовими: від паралельної (Φ_1) та від серієсної (Φ_2) обмоток. Тоді швидкісні характеристики (рисунок 3.14) можна записати у вигляді

$$n = \frac{U}{C_E(\Phi_1 + \Phi_2)} - \frac{R_a + R_d}{C_E(\Phi_1 + \Phi_2)} \cdot I; n_0 = \frac{U}{C_E\Phi_1}.$$

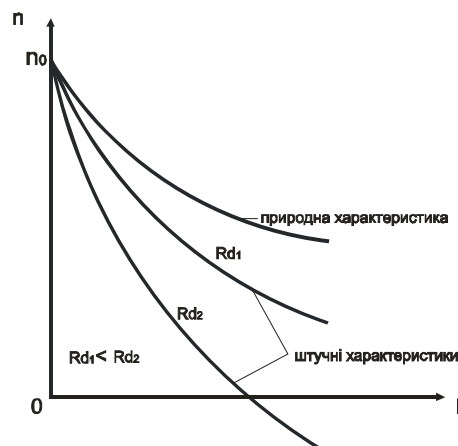


Рисунок 3.14 - Швидкісні характеристики компаундного двигуна

Моментна характеристика має вигляд, показаний на рисунку 3.15.

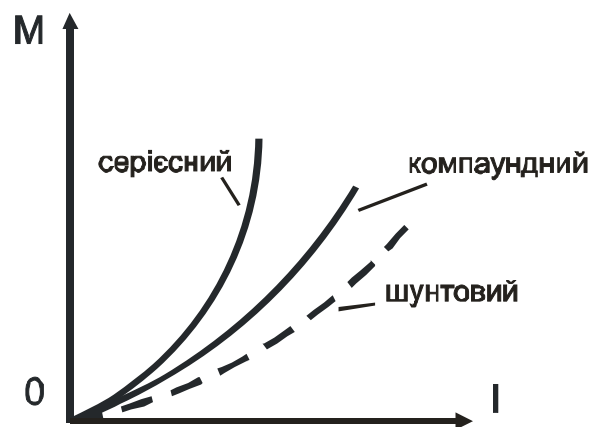


Рисунок 3.15 - Моментна характеристика компаундного двигуна

Характеристика ККД має практично однаковий вигляд для всіх типів двигунів (рисунок 3.16).

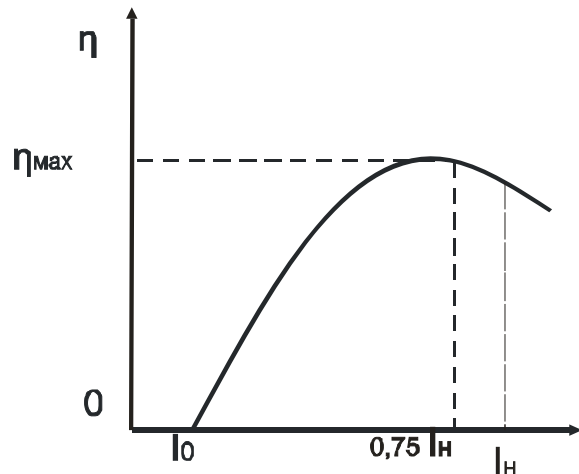


Рисунок 3.16 - Характеристика ККД компаундного двигуна

Механічні характеристики (рисунок 3.17)

$$n = \frac{U}{C' (\Phi_1 + \Phi_2)} - \frac{R_a + R_d}{C'' (\Phi_1 + \Phi_2)} M .$$

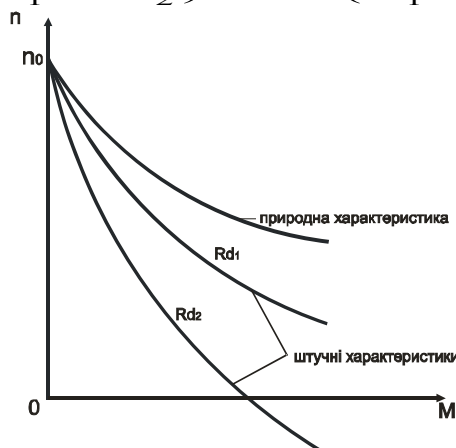


Рисунок 3.17 - Механічні характеристики компаундного двигуна

3.5 Способи пуску та регулювання частоти обертання

двигунів постійного струму

Двигуни постійного струму дозволяють легко і плавно регулювати частоту обертання та мають високу перевантажуваність. У цьому їх велика перевага перед двигунами змінного струму. Для пуску двигунів насамперед треба подати повне збудження у двигунах паралельного чи змішаного збудження. Магнітний потік, який виникає, є запорукою пускового моменту. Двигуни послідовного збудження не можна вмикати в режимі холостого ходу, а тільки з навантаженням на валу, наприклад при з'єднанні з колісною віссю електровоза.

Двигуни малої потужності - до 5 кВт можна пускати прямим ввімкненням в мережу. Пусковий струм великий і викликає спалах іскріння щіток, який не повинен призводити до прогресуючого нагару щіток та колектора. У супротивному разі прямі пуски не дозволяються.

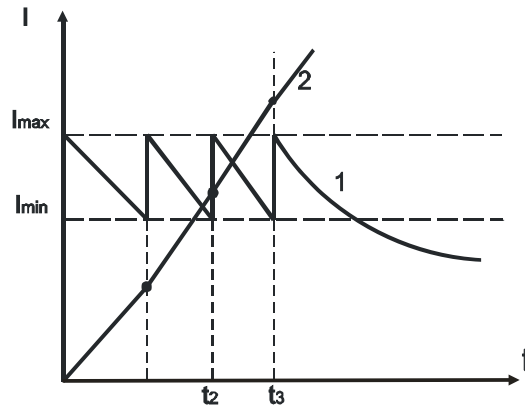
Основними видами пуску двигунів постійного струму є реостатний та від джерела регульованої напруги. При реостатному пуску в електричне коло якоря вмикаються резистори, котрі перевмикаються в процесі пуску комутаційними апаратами. Величина резисторів, які вмикаються в коло якоря, повинна обмежувати пусковий струм до заданої величини. На основі рівняння напруги в колі якоря пусковий струм визначається як

$$I = \frac{U - E}{R_a + R_d}.$$

У момент пуску $E \approx 0$, а $R_d \gg R_a$, тоді

$$I_{\max} \approx \frac{U}{R_d}.$$

По мірі розгону двигуна з'являється ЕРС і величина струму в обмотці якоря спадає. При зниженні струму до заданої величини виключаються ступені резисторів вмиканням контакторів. Діаграма пуску з чотирма ступенями резисторів подана на рисунку 3.18.



1 – струм; 2 – частота обертання

Рисунок 3.18 - Діаграма реостатного пуску двигуна постійного струму

У моменти часу t_1, t_2, t_3 вимикаються ступені пускового реостату. Звичайно $I_{\max} = (1.5 \div 1.7)I_n$, $I_{\min} = (1.1 \div 1.2)I_n$.

Пуск від джерела регульованої напруги часто використовується в широкорегульованих приводах постійного струму таких, як системи FD або ТП-D.

Система FD складається з генератора та двигуна незалежного збудження. Генератор обертається від первинного двигуна змінного струму. Якщо первинний двигун синхронний, то систему називають системою Леонарда, якщо асинхронний – Ільгнера. Агрегати Ільгнера застосовуються рідко. Система ТП-D складається із регульованого тиристорного перетворювача і двигуна постійного струму. Системи FD та ТП-D за принципом роботи привода подібні. Система FD подана на рисунку 3.19.

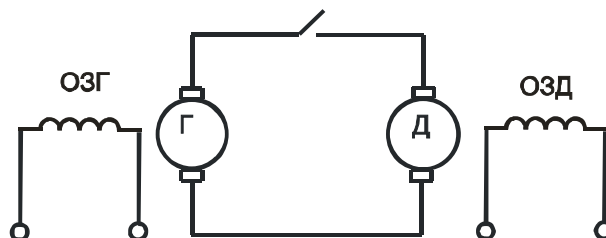


Рисунок 3.19 - Система FD

Пуск двигуна здійснюється підйомом напруги на генераторі шляхом підвищення струму збудження в обмотку збудження генератора (ОЗГ). Струм збудження двигуна повинен бути при цьому номінальним. Величина пускового струму регулюється системою управління. При великих струмах розгону $2I_n$ і більших пуск найбільш крупних МПС з діаметром якоря до 4 м триває 1-1,5 с.

Система FD призначена для широкого регулювання частоти обертання. Частота обертання двигунів постійного струму регулюється двома способами: зміною напруги на якорі при незмінному струмі збудження; регулюванням струму збудження при незмінній напрузі на якорі. Обидва способи реалізуються в системах FD та ТП-Д. Серієсні двигуни мають свої особливості регулювання, так як струм збудження є струмом навантаження. Регулювання частоти обертання двигуна незалежного збудження описується формулою швидкісної характеристики

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_a + R_d}{C_E \Phi} I.$$

При першому способі регулювання $\Phi = \text{const}$. Зміна напруги пропорційно змінює частоту обертання в режимі холостого ходу — $n_0 = U / (C_E \Phi)$. Якщо в колі якоря $R_d = 0$, то $\Delta n = IR_a / (C_E \Phi)$, невелике близько (4-5%) n_n . Якщо при незмінній напрузі на якорі ввімкнути в коло якоря додатковий резистор, то напруга на обмотці якоря знизиться на величину падіння напруги на резисторі і двигун перейде на штучну швидкісну характеристику. Цей спосіб регулювання є різновидом загального способу регулювання зміною напруги на якорі. Перший спосіб регулювання частоти обертання має назву регулювання при постійному моменті. Якщо регулювання йде при I_n , то $M = \text{const}$, оскільки за умови регулювання магнітний потік практично не змінюється, тоді

$$M = C_M \Phi I_n \approx \text{const}.$$

Другий спосіб регулювання називається регулювання полем і відповідає умовам регулювання при постійній потужності

$P_1 = UI_n \approx const$. Момент в цьому випадку знижується обернено пропорційно росту частоти обертання. Глибина регулювання полем досягає 5-6 кратної величини відносно номінальної частоти обертання. При глибокому ослабленні поля виникають ускладнення по комутації і може мати місце нестійка робота двигуна, що проявляється в самовиробничому рості частоти обертання. Двигуни не допускають обриву кола збудження. Згідно з формулою швидкісної характеристики при втраті магнітного потоку двигун йде в рознос.

Двигуни послідовного збудження мають м'які швидкісні характеристики і частота обертання сама змінюється в широкому діапазоні при зміні навантаження. Однак для розширення діапазону регулювання в цих двигунах також здійснюються обидва способи регулювання. Наприклад, тягові двигуни тепловозів живляться від генератора, в якому регулюють напругу. Тягові двигуни електровозів регулюються ввімкненням в коло якоря додаткових резисторів. Регулювання полем здійснюється шунтуванням обмотки збудження резисторами для регулювання вгору (рисунок 3.20) або шунтуванням якоря для регулювання вниз (рисунок 3.21).

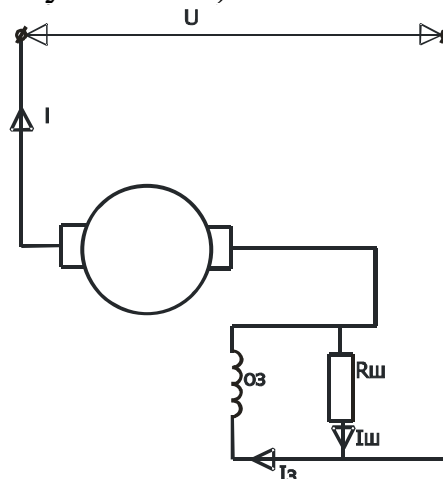


Рисунок 3.20 - Схема ослаблення поля збудження серієсного двигуна

Відношення $\beta = I_з / I$ має назву коефіцієнта ослаблення поля, який може досягати в тяговому приводі 25 %.

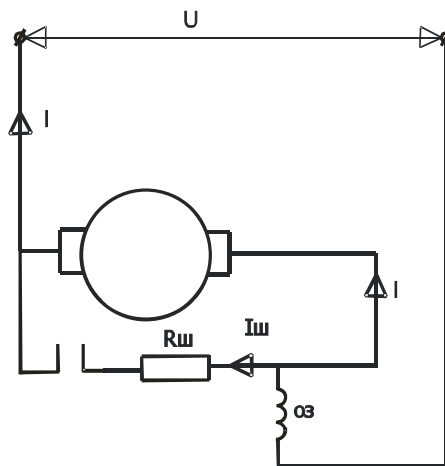


Рисунок 3.21 - Схема посилення поля збудження серієсного двигуна

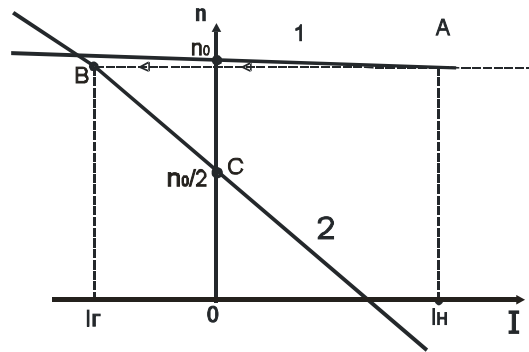
При другому способі регулювання в обмотці збудження протікає струм I більший, ніж в обмотці якоря, рівний $I_3 = I_u + I_a$. При малонасиченій магнітній системі цей спосіб ефективний з точки зору глибини регулювання.

3.6 Способи регулювання двигунів постійного струму

Основні способи гальмування застосовуються при незалежному збудженні двигунів. Серієсні двигуни в гальмових режимах також мають незалежне збудження, за винятком випадку, коли двигун працює в режимі серієсного генератора. Всі види гальмування характеризуються зміною напрямку дії електромагнітного моменту, тобто переводом двигуна в генераторний режим роботи.

Існують три основних способи гальмування: рекуперативне, противвімкненням та динамічне. Рекуперативне гальмування буває, коли ЕРС двигуна стане вищою за напругу, прикладену до якоря, тоді струм навантаження змінює напрям і двигун переходить в генераторний режим роботи. Електромагнітний момент з рушійного становиться гальмівним. Гальмування може здійснюватись на природній характеристиці або для обмеження гальмівного струму на штучній. Гальмування виникає, коли частота обертання стане вища за частоту обертання ідеального

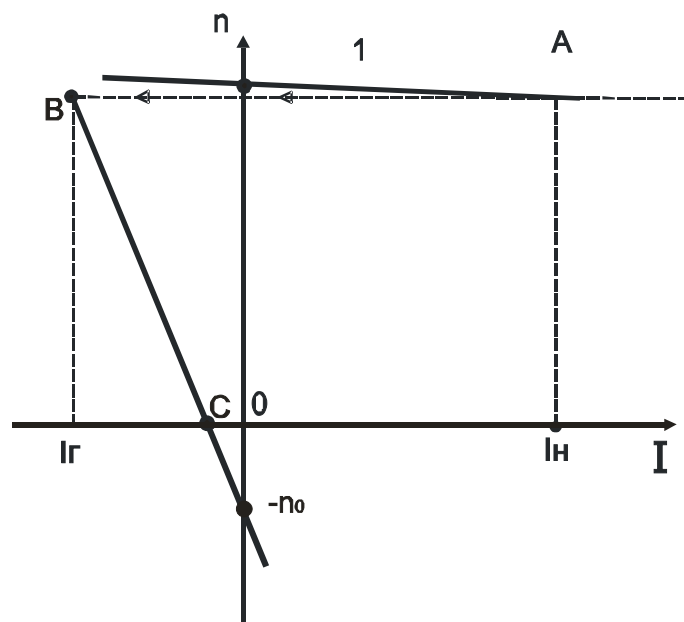
холостого ходу. Практично це буває при перевімкненні двох або більше двигунів з паралельного на послідовне з'єднання, як буває при перегрупуванні двигунів в тяговому приводі електровозів постійного струму. У такому разі напруга на кожному двигуні зменшується у два рази і настає режим гальмування (рисунок 3.22).



- 1 – вихідний стан на природній характеристиці (A);
- 2 – режим гальмування (BC) на штучній характеристиці;
- I_r – гальмівний струм

Рисунок 3.22 - Рекуперативне гальмування двигуна постійного струму

Гальмування противімкненням (рисунок 3.23) здійснюється на штучних характеристиках при зміні полярності, підведеної до якоря напруги. При зупинці двигуна його слід вимкнути із мережі, щоб не змінився напрям руху.



- 1 – вихідний стан на природній характеристиці (А);
- 2 – режим гальмування (BC) на штучній характеристиці

Рисунок 3.23 - Гальмування противв'імкненням двигуна постійного струму

При гальмуванні противв'імкненням гальмівний струм визначається формулою

$$I_r \cong \frac{-U - E}{R_d}.$$

Існує друга різновидність гальмування цим способом. Якщо в коло якоря в'імкнути великий додатковий опір, напрям дії моменту зберігається, але його недостатньо, щоб обертати двигун в старому напрямі, тоді двигун змінює напрям обертання і буде працювати в режимі противв'імкнення на відрізку BC штучної характеристики (рисунок 3.24).

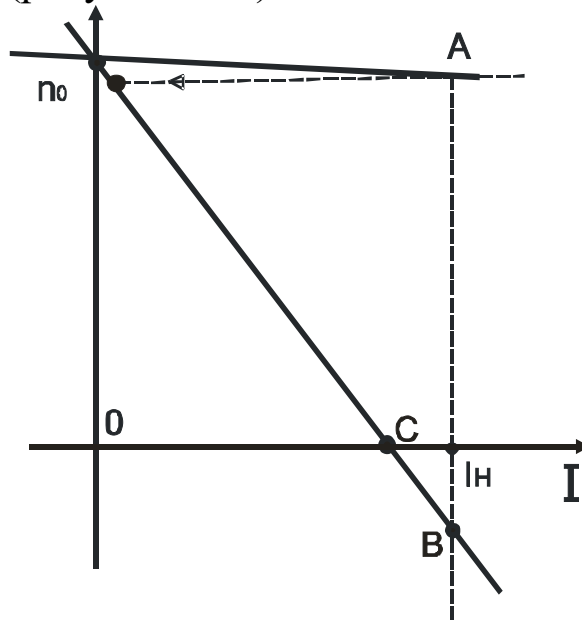


Рисунок 3.24 - Гальмування методом «спуску тягара» двигуна постійного струму

Цей метод має назву «спуску тягара» й застосовується для

спуску в шахтні забої вантажних клітей. Гальмовий струм при цьому способі також визначається сумою напруги та ЕРС, як і в першому випадку. Тому ці обидва види гальмування об'єднують в один.

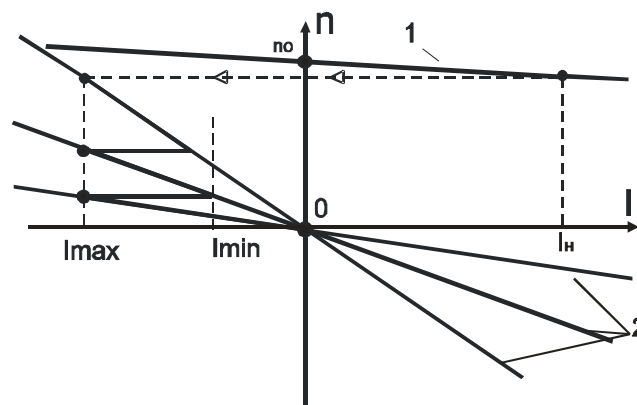
$$I_r \cong \frac{(U + E)}{R_d}.$$

Обидва розглянутих способи легко здійснюються в системах Г-Д. При зниженні напруги генератора має місце рекуперативне гальмування, а при зміні полярності – противімкненням.

Динамічне гальмування дуже поширений спосіб (рисунок 3.25). На електротранспорті його називають реостатним гальмуванням. Динамічне гальмування здійснюється при повному незалежному збудженні. Якорь вимикається з мережі і вмикається на додатковий опір. Струм гальмування визначається формулою

$$I_r \cong \frac{E}{R_d}.$$

Гальмування здійснюється з перевімкненням гальмового опору з більших значень на менші. Двигун гальмується до зупинки.



- 1 – початковий стан на природній характеристиці – А;
2 – гальмові характеристики

Рисунок 3.25 - Динамічне гальмування двигуна постійного струму

Двигуни послідовного збудження, наприклад тягові, гальмуються при незалежному збудженні. Однак існує один спосіб динамічного гальмування при самозбудженні з послідовною обмоткою збудження. Для виконання такого гальмування змінюється полярність обмотки збудження.

4 ВТРАТИ ТА ККД

Перетворювання енергії в електричних машинах супроводжується втратами певної її частини. Ці втрати енергії можна розділити на основні й додаткові.

Основні втрати складаються з втрат механічних, магнітних (у сталі) і електричних. Додаткові втрати виникають як у сталених, так і в мідних частинах машин і викликаються вторинними процесами електромагнітного характеру. До даних належать втрати на вихрові струми від полів розсіяння, поверхневі втрати в сталі, пульсаційні втрати в зубцях і т. ін.

Усі втрати, що виникають, перетворюються в теплоту і викликають нагрівання машин.

Механічні втрати складаються із:

- втрат у підшипниках P_n ;
- втрати на тертя щіток об колектор або контактні кільця P_k ;
- втрати на тертя об повітря, куди входять і вентиляційні втрати P_B .

Механічні втрати не залежать від навантаження машини, а залежать тільки від частоти її обертання. Вони визначаються за відповідними, відомими з механіки формулами і становлять близько 1% номінальної потужності машини. Таким чином,

$$P_{MX} = P_n + P_k + P_B .$$

Втрати в сталі складаються із втрат на гістерезис і вихрові струми, викликані перемагнічуванням сталі осердь. Ці втрати в

кожній частині машини, яка має масу m_c , при будь-якій частоті f та індукції B розраховують за формулою

$$P_C = P_{1/50} \left[\frac{f}{50} \right]^\beta \cdot B^2 m_c,$$

де $P_{1/50}$ – питомі втрати для даної марки сталі, $\beta = 1,5$.

Електричні втрати складаються із втрат у міді обмоток

$$P_M = I^2 R$$

і перехідних втрат у контактні щітки

$$P_{щ} = \Delta U_{щ} I,$$

де $\Delta U_{щ}$ – спад напруги в щітковому контакті, який, згідно з ГОСТ 2582-81, дорівнює 3 або 2 В відповідно для щіток без шунтів або з шунтами.

Додаткові втрати практично не можуть бути розраховані через складний характер їх виникнення. Тому для всіх електричних машин їх приймають згідно з ГОСТ 11828-86 рівними 0,5...1% від номінальної потужності.

Повні втрати являють собою суму всіх втрат:

$$\sum P = P_{мх} + P_C + P_M + P_{щ} + P_{дод}.$$

Їх можна розділити на дві групи:

- 1 втрати, що не залежать від струму: механічні та магнітні;
- 2 втрати, що залежать від струму: електричні та втрати в щітковому контакті.

Втрати та ККД машини можна розглянути на прикладі двигуна паралельного збудження. ККД двигуна $\eta = \frac{P_2}{P_1}$,

де P_2 – корисна потужність на валу;

P_1 – потужність, що споживається з мережі.

Корисна потужність на валу $P_2 = M_2\omega$,

де M_2 – реальний обертальний момент на валу.

Потужність, що споживається з мережі, $P_1 = UI_{дв} = U(I + I_3)$, тобто враховуються втрати енергії в обмотці збудження.

Таким чином, ККД можна визначити за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P},$$

де $\sum P$ – сумарні втрати в двигуні.

Сумарні втрати складаються з таких видів втрат:

1) втрати в обмотці збудження

$$P_3 = I_3 U_3 = I_3 R_3$$

2) втрати в обмотці якоря

$$P_я = I^2 \sum R_я;$$

3) Втрати механічні $P_{мех}$ – це втрати від тертя, охолодження двигуна та інше. Вони залежать від особливостей експлуатації і точно розрахувати їх неможливо;

4) Втрати магнітні в якорі ($P_{м.я.}$) пов'язані з явищем реакції якоря.

Таким чином, $\sum P = P_3 + P_я + P_{мех} + P_{м.я.}$

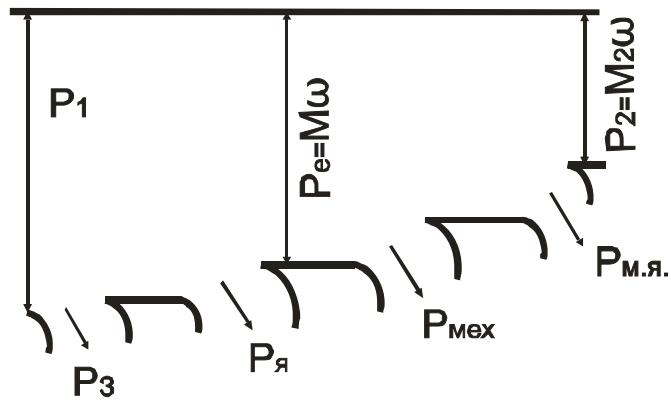


Рисунок 4.1. Енергетична діаграма

З енергетичної діаграми бачимо, що електромагнітна потужність (P_c) відрізняється від P_1 на втрати в обмотках збудження та якоря (рисунок 4.1)

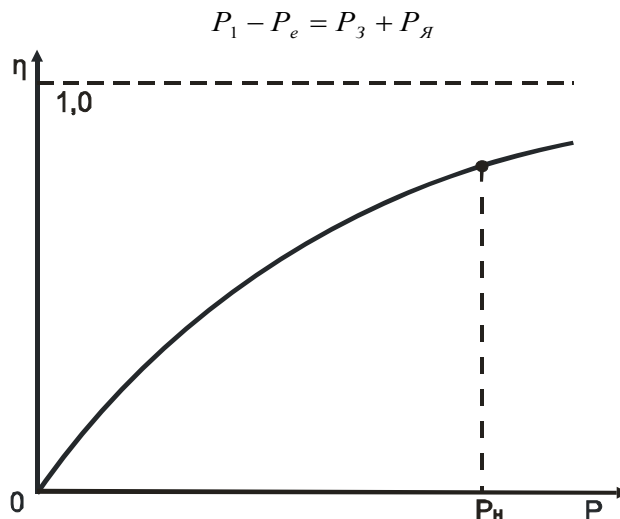


Рисунок 4.2 - ККД машини постійного струму

ККД машини постійного струму (рисунок 4.2) залежить від її потужності та навантаження. ККД машини змінюється від нуля (при неробочому ході) до найбільшого (при номінальній потужності). ККД машин промислового використання становить 80...90 %. В авіаційних двигунах та генераторах постійного струму ККД звичайно 75...80 %.

