

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



М. Л. Глєбова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

**(МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ
ТА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ)**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія, G4.03 –
Енерговиробництво (Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика))*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026**

Глебова М. Л. Електричні машини (Машини постійного струму та вентильні двигуни) : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія, G4.03 – Енерговиробництво (Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика) / М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 54 с.

Автори : канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

О. М. Петренко, доктор технічних наук, професор кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 13 від 25.06. 2025

© М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун, 2026
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	5
1 Машини постійного струму.....	8
1.1 Побудова та принцип дії генератора і двигуна постійного струму.....	8
1.2 Електрорушійна сила обмотки якоря, електромагнітний момент.....	11
1.3 Магнітне поле та реакція якоря машин постійного струму.....	13
1.4 Комутація в машинах постійного струму.....	16
1.5 Рівняння генераторів постійного струму.....	23
1.6 Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження.....	24
1.7 Рівняння двигунів постійного струму.....	29
1.8 Характеристики двигунів постійного струму паралельного, послідовного та змішаного збудження.....	31
1.9 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму.....	36
2 Принцип дії вентильний реактивних двигунів.....	38
2.1 Пристрій і принцип дії вентильних реактивних двигунів.....	38
2.2 Характеристики вентильних реактивних двигунів.....	44
2.3 Вентильний електродвигун постійного струму.....	47
Список рекомендованої літератури.....	53

ВСТУП

Сучасна енергетика становить складну багаторівневу ієрархічну структуру, призначену для забезпечення комфортних умов проживання населення, а також сталого функціонування промислових підприємств, виробництв і закладів. Лише на основі надійної та ефективної системи забезпечення споживачів різного рівня потрібною енергією та енергетичними ресурсами можливі їх сталі функціонування і розвиток. Політична та економічна незалежність і безпека держави значною мірою визначаються виробництвом енергетичних ресурсів, їх кількістю та якістю.

Різноманіття форм існування енергії, властивість їх взаємоперетворення дозволяє використовувати для виробництва і споживання енергії різні енерготехнології, енергоресурси та енергоносії, визначає їх взаємозамінність. Енергетична цінність ресурсів, ефективність способів їх перетворення, ступінь досконалості процесів і установок, технологічних стадій енергетичного виробництва інтегрально визначається, ефективністю використання первинних енергоресурсу (коефіцієнтом корисної дії енергоустановки).

Енергетика – галузь народного господарства, що охоплює виробництво, перетворення і використання різних форм енергії. В енергетиці використовують такі п'ять видів установок або систем:

- генеруючі – перетворюють потенційну або хімічну енергію природних енергетичних ресурсів на електричну, теплову, механічну або інший вид енергетичного ресурсу (наприклад, турбоустановки, газогенеруючі установки, котли, компресори);

- перетворювальні – змінюють параметри та інші особливості певного виду енергії (трансформаторні підстанції, інверторні електроустановки, трансформатори теплоти та ін.);

- мережі – призначені для передачі і розподілу енергії (електричні, теплові, газові, нафтопроводи, мережі стиснутого повітря та ін.);

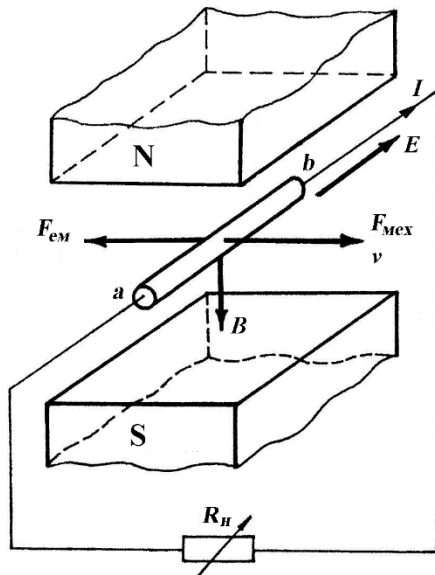
- акумулюванні – призначені для часткового регулювання режиму виробництва енергії (електричні і теплові акумулятори, насосно-акумулюванні гідроелектричні тощо);

- споживаючі – призначені для перетворення енергії до вигляду, в якому її безпосередньо використовують (електричний привід машин, опалювальні установки, промислові печі, світильники та ін.).

Питання, пов'язані з розрахунками, проектуванням та особливостями експлуатації енергетичних установок, розглянуто в загальному курсі «Енергетичні установки». Цей лекційний курс присвячений сучасним технологіям виробництва електроенергії на сучасному етапі розвитку енергетики, обов'язковою складовою реалізації яких є зазначені вище енергоустановки і, відповідно, теоретичні та практичні питання, пов'язані з їх створенням та експлуатацією.

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ОБОРОТНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Використання електричних машин як двигунів та генераторів є їх основним призначенням, оскільки пов'язане винятково із взаємним перетворенням електричної та механічної енергії, а трансформатор, призначений як для перетворення струмів і напруг однієї величини, так і струмів і напруг іншої при незмінній частоті.



Розглянемо на макеті, що складається з двох полюсів і провідника, процес взаємного перетворення механічної і електричної енергії (рис. 1). Якщо до провідника *ав* довжиною *l* прикласти механічну силу *F_{мех}*, то він буде переміщуватися з лінійною швидкістю *v* у напрямі дії сили. Згідно із законом електромагнітної індукції, у провіднику *ав* буде виникати електрорушійна сила (ЕРС):

$$E = B l v, \quad (1)$$

де *B* – магнітна індукція, Тл.

Рисунок 1 – Елементарний генератор

Потрібно пам'ятати, що напрям ЕРС в провіднику визначається *правилом правої руки*. Долоню правої руки розташовують у магнітному полі так, щоб лінії індукції входили в неї, відігнутий на 90° великий палець показував напрям руху провідника відносно поля, тоді чотири пальці будуть показувати напрям ЕРС (на рис. 1 від *a* до *b*).

Якщо замкнути провідник на навантаження *R_n*, то в колі під дією ЕРС у напрямі, що співпадає з її напрямом, виникне *струм I*. Таким чином, провідник, що рухається в магнітному полі, можна розглядати як *елементарний генератор*.

Своєю чергою, на провідник зі струмом в магнітному полі, згідно з явищем електромагнітної індукції, діє *електромагнітна сила* (сила Ампера):

$$F_{em} = B l I. \quad (2)$$

Напрямок цієї сили визначається *правилом лівої руки*. Долоню лівої руки розміщують назустріч лініям поля, чотири витягнуті пальці – за напрямом струму, тоді великий палець, відігнутий на 90°, покаже напрям сили. На рисунку 1 вона направлена справа наліво, тобто назустріч руху провідника, а отже, є гальмівною.

Уявимо, що рух провідника рівномірний ($v = \text{const}$), тоді сили – механічна і електромагнітна – урівноважують одна одну: $F_{\text{мех}} = F_{\text{ем}}$. Оскільки $v \neq 0$, то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість, отримаємо:

$$F_{\text{мех}} v = F_{\text{ем}} v. \quad (3)$$

Скориставшись (2), підставимо в праву частину значення $F_{\text{ем}}$:

$$F_{\text{мех}} v = B l I v = E I \quad (4)$$

У лівій частині цього рівняння маємо значення підведеної до провідника механічної потужності, а в правій – значення електричної потужності, що розвивається в замкнутому колі струмом I під дією ЕРС E . Отже, можна стверджувати, що цей макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється на електричну.

Якщо в цьому макеті замість опору навантаження увімкнути (рис. 2) джерело живлення з напругою U , то в провіднику, під дією останньої, виникне електричний струм I від плюса джерела до мінуса.

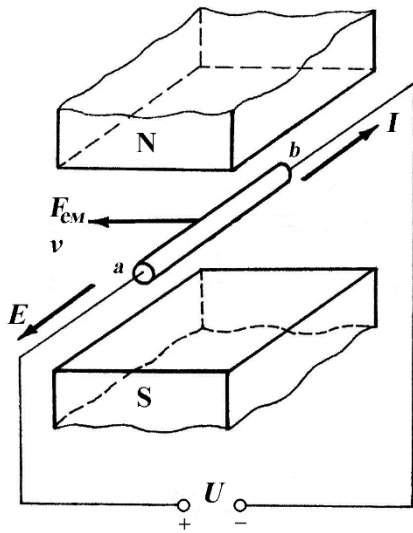


Рисунок 2 – Елементарний двигун електричного кола R:

Як і в попередньому випадку, на провідник буде діяти сила $F_{\text{ем}}$, напрям якої визначиться правилом лівої руки справа наліво. Під дією цієї сили провідник буде переміщуватися в тому ж напрямі, у якому діє $F_{\text{ем}}$, що приведе до появи ЕРС E . Скористаємося правилом правої руки і побачимо, що напрям ЕРС протилежний напрямам струму та напруги. Отже, згідно з другим законом Кірхгофа частина прикладеної напруги урівноважується ЕРС E , а частина падінням напруги на якорі

$$U = E + I R. \quad (5)$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм I (який зазвичай не дорівнює нулю), отримаємо:

$$U I = E I + I^2 R. \quad (6)$$

Якщо в цьому рівнянні E замінити згідно з (1), то будемо мати:

$$U I = B l v I + I^2 R \quad (7)$$

або згідно з (2):

$$U I = F_{\text{ем}} v + I^2 R. \quad (8)$$

У лівій частині отриманого рівняння – значення електричної потужності, що надходить у провідник із джерела живлення, а в правій те, на що вона перетворюється. Частково це, згідно з (3), механічна потужність ($F_{\text{ем}} v$), а частково електричні втрати ($I^2 R$), що виникають у провіднику при протіканні струму. Отже, можна вважати, що в цьому випадку макет демонструє роботу елементарного електродвигуна.

Аналізуючи роботу макета в обох випадках, можна зробити такі висновки:

- щоб отримати електричну машину, необхідно мати магнітне поле, електропровідне середовище (провідник) та можливість їх взаємного переміщення;

- при роботі електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна в її провідниках, що перетинають магнітне поле, створюється ЕРС і виникають електромагнітні сили, що діють на провідник зі струмом в магнітному полі;

- взаємне перетворення механічної енергії на електричну і навпаки відбувається в електричній машині в будь-якому напрямі, тобто одна і та сама машина може працювати і як двигун, і як генератор; ця властивість називається оборотністю електричної машини.

Розглянуті «елементарні» генератор та двигун відображують лише принцип використання в них основних законів та явищ електричного струму. Що стосується конструктивного виконання, то більшість електричних машин побудовані на обертовому русі однієї із двох складових частин, яка називається ротором. Нерухома частина називається статором. Ротор розміщений у розточці статора і відокремлений від нього повітряним зазором. Залежно від функціонального призначення ці дві складові частини поділяють на індуктор і частину машини, яка створює магнітне поле та якір, це частина, в якій індуктується ЕРС. Розміщення індуктора і якоря на статорі чи роторі залежить від виду та призначення машини, але будь-яке їх розміщення не впливає на принцип роботи.

1 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Побудова та принцип дії генератора і двигуна постійного струму

Принцип дії генератора базується на явищі електромагнітної індукції і полягає в тому, що при обертанні в магнітному полі електропровідної рамки (обмотки) в її провідниках виникає змінна ЕРС, миттєве значення якої при рівномірному обертанні з кутовою частотою обертання ω визначається так:

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

де t – час, с.

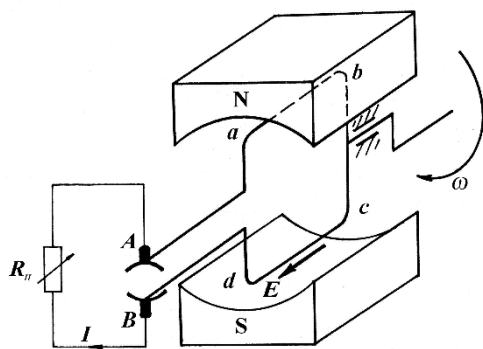


Рисунок 1.1 – Спрощена модель генератора постійного струму

Щоб мати генератор постійного струму, необхідно цю ЕРС випрямити, як випрямляч слугує колектор. Розглянемо, як відбувається випрямлення змінної ЕРС на макеті (рис. 1.1), що складається з постійного магніту, між полюсами N і S якого розміщена електропровідна рамка $abcd$. Кінці рамки з'єднані з двома ізолюваними півкільцями, до яких дотикаються дві нерухомі щітки A і B . Рамка $abcd$ завдяки підшипнику має можливість обертатися разом із півкільцями. ЕРС, що створюється при обертанні рамки, викликає струм в

колі рамка – щітка B – R_n – щітка A . Напрямок і величина ЕРС та струму в рамці $abcd$ визначаються положенням провідників рамки під полюсами і напрямом обертання. Однак при обертанні, незалежно від положення провідників під полюсами, із щіткою A буде з'єднаний через «своє» півкільце провідник, що розташовується під полюсом N , а із щіткою B – провідник, розташований під полюсом S . Струм зовнішнього кола в цьому макеті спрямований від щітки B (її називають *позитивною*) до щітки A (*негативної*). Зміна струму на опорі навантаження буде відбуватися лише за величиною, але не за напрямом, тобто, він буде пульсувати від нуля до максимуму (рис. 1.2, б). Якщо в макеті замість однієї взяти дві взаємно перпендикулярні рамки з чотирма пластинами, то це дозволить знизити пульсацію струму (рис. 1.2, в), а при восьми рамках і 16-ти пластинах пульсація практично зникне взагалі (рис. 1.2, г), тобто струм буде постійним. Отже, в генераторі постійного струму колектор і щітки відіграють роль *механічного випрямляча* змінного струму, що виникає в обмотці якоря, на постійний у зовнішньому колі машини.

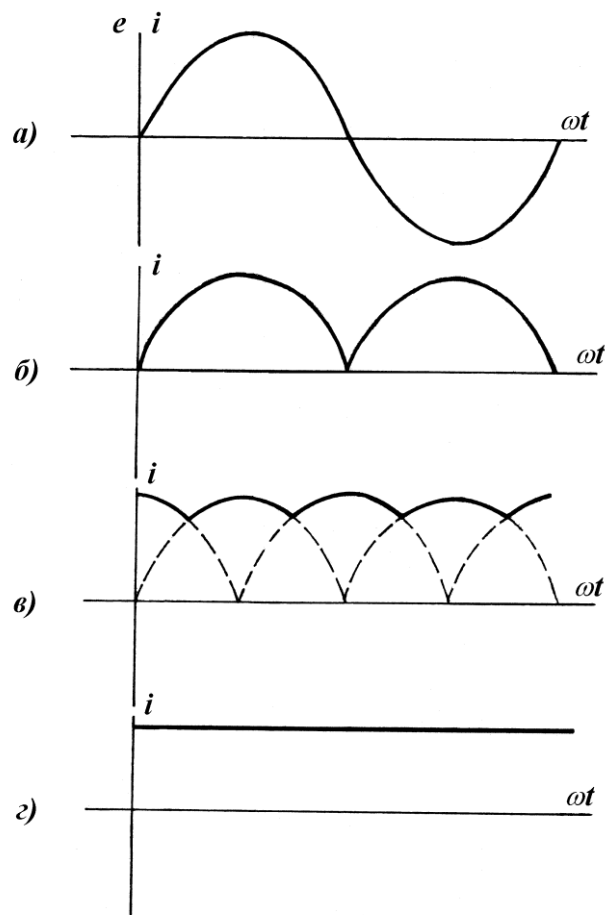


Рисунок 1.2 – Графік змінювання ЕРС і струму в рамці (а) та на опорі навантаження (б – г)

Відповідно до принципу *оборотності* макет (рис. 1.1) генератора може слугувати макетом двигуна. Якщо замість опору навантаження увімкнути джерело живлення, то по рамці буде протікати струм і на провідники рамки будуть діяти електромагнітні сили. Вони створять *електромагнітний момент*, під його дією рамка зможе обертатися (рис. 1.3). Завдяки півкільцям та щіткам (наприклад, щітка A позитивна, а B негативна) постійний струм джерела живлення перетворюється на змінний у рамці. Це дозволяє при переміщенні провідника від одного полюса до іншого змінити напрям струму в провіднику на протилежний, тому що півкільце одночасно переміщується з-під щітки A під щітку B . При зміні напрямку струму в провідниках напрям електромагнітного моменту залишається незмінним. Таким чином, при роботі машини в режимі двигуна колектор і щітки відіграють роль механічного *інвертора*, тобто перетворюють постійний струм джерела на змінний в обмотці якоря.

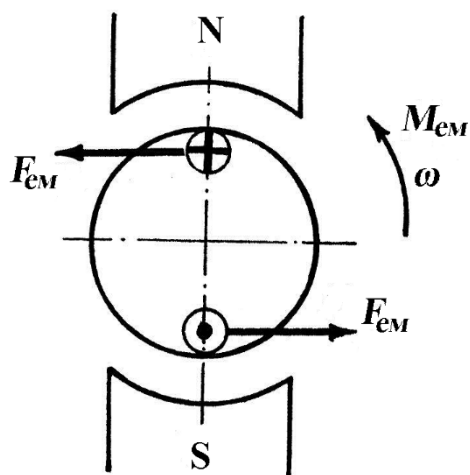


Рисунок 1.3 – До принципу дії
двигуна постійного струму

показано на рисунку 1.4, а.

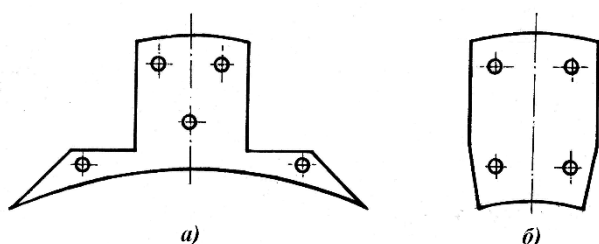


Рисунок 1.4 – Пластини головного (а)
та додаткового (б) полюсів

виготовляються так, як і основні полюси, їх пластини виглядають так, як показано на рисунку 1.4, б.

В машинах малої потужності число додаткових полюсів може бути в два рази менше, ніж основних. Зовні до ярма кріплять клемну коробку та лапи для монтажу машини. В клемну коробку виводять кінці обмоток: Я1, Я2 – обмотка якоря; Ш1, Ш2 – обмотка збудження паралельна; С1, С2 – обмотка збудження послідовна; Д1, Д2 – обмотка додаткових полюсів; К1, К2 – компенсаційна обмотка.

Ярмо разом із полюсами, лапами та клемною коробкою називають ще *станиною*. З боків до станини кріплять *підшипникові щити*. Вони призначені для центрування ротора відносно статора і створення рівномірного повітряного зазору між полюсами та ротором. На одному із підшипникових щитів (він називається *передній*) розміщений *щітковий апарат*. Щітковий апарат складається з *траверси, щіткових пальців, щіткотримачів та щіток*. Траверза, кільцева або променева, дозволяє зміщувати щітки на деякий кут відносно їх основного положення. Щіткові пальці призначені для ізолювання щіток між собою та від станини; вони виготовляються із гетинаксу чи текстоліту з прямокутним або круглим перерізом. Щіткотримачі складаються з *щіткового*

Як і будь-яка електрична машина, електрична машина постійного струму складається з двох частин – статора і ротора. На статорі розташований індуктор, а на роторі – якір. Індуктор на статорі в машині постійного струму призначений для створення магнітного поля, зазвичай електромагнітним шляхом, тобто *обмоткою збудження*. Ця обмотка виготовляється у вигляді котушки (з каркасом чи без нього) з мідного дроту і насаджується на *основний (головний) полюс*. Число основних полюсів в машині – $2p$ (тоді p – число пар полюсів). Основні полюси виготовляються шляхом штампування із листів конструкційної сталі товщиною 1–1,5 мм і виглядають так, як

Із пластин набирається пакет полюса, який, своєю чергою, кріпиться до *ярма*. Ярмо слугує для замикання магнітного потоку між полюсами. Воно виготовляється шляхом лиття або відрізається з товстостінної труби. Матеріал – чавун або сталь. Між основними полюсами до ярма кріпляться *додаткові полюси*, які

гнізда, пружини та притискача. Щіткотримач забезпечує положення щітки на осі машини і створює необхідний тиск на колектор. Щітки виготовляють з мідно-графітової суміші, впресовуючи в неї мідний тросик для з'єднання кола якоря. Ротор складається з вала, на який насаджений пакет заліза з пазами для укладання обмотки якоря. Пакет заліза набирається (*шихтується*) з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35–0,5 мм, що ізолюють один від іншого спеціальним лаком для зниження втрат на *вихрові струми*. Обмотка якоря з мідного дроту вкладається в пази і з'єднується з колектором. Колектор виготовляється з *колекторних пластин* трапецієподібного перерізу, що мають форму, зображену на рисунку 1.5.

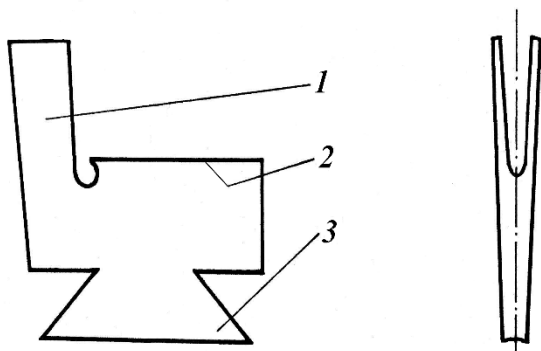


Рисунок 1.5 – Назва: 1 – колекторна пластина; 2 – робоча поверхня; 3 – ластівчин хвіст

Щітка притискається до робочої поверхні колекторної пластини. Півнік необхідний для з'єднання пластини з обмоткою. Колекторні пластини ізолюють між собою і валом ротора *міканітовими прокладками* і стягують спеціальними *конусними гайками* та *шайбами*, створюючи колектор, насаджений на вал. На валу машини зі сторони, протилежної колектору, для поліпшення охолодження зазвичай

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

1.2 Електрорушійна сила обмотки якоря, електромагнітний момент

При обертанні обмотки якоря в магнітному полі машини в кожному її провіднику створюється ЕРС:

$$E_{np} = B_{cp} l v, \quad (1.2)$$

де B_{cp} – середнє значення магнітної індукції, Тл; l – довжина провідника в пазу, тобто довжина якоря, м;

$$v = \omega \frac{D_a}{2} \quad (1.3)$$

де ω – лінійна швидкість провідника в магнітному полі, м/с.

Середнє значення індукції пропорційне загальному потоку, що пронизує циліндр якоря і зворотно пропорційне його площині:

$$B_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi D_a l} \quad (1.4)$$

де Φ – магнітний потік одного полюса, Вб; D_a – діаметр якоря, м.

З урахуванням (1.2), (1.3) та (1.4) ЕРС провідника

$$E_{np} = \frac{p}{\pi} \Phi \omega \quad (1.5)$$

ЕРС обмотки та ЕРС, що створюється в одній паралельній вітці $\frac{N}{2a}$ провідниками:

$$E_a = E_{np} \frac{N}{2a} \quad (1.6)$$

Таким чином,

$$E_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega, \quad (1.7)$$

де $\frac{pN}{2\pi a}$ – *електромашинна постійна*.

Отже, остаточна формула ЕРС якоря така:

$$E_a = k \Phi \omega \quad (1.8)$$

Варто зазначити, що максимальне значення E_a (1.6) буде мати лише в тому випадку, коли щітки розташовані на *поперечній осі* машини, яку називають *геометричною нейтраллю*. При зміщенні щіток з нейтралі на кут β значення ЕРС буде змінюватися:

$$E_a = k \Phi \omega \cos \beta. \quad (1.9)$$

При протіканні струму по провідниках якоря, що розташовані в магнітному полі, на кожен із провідників діє електромагнітна сила

$$F_{em} = B_{cp} l i_a, \quad (1.10)$$

де $i_a = I_a/2a$ – струм, що протікає по провіднику, A .

Враховуючи, що провідники обмотки якоря рівномірно розміщені по циліндру якоря, сили, які діють на кожен із провідників, створюють результуючий електромагнітний момент:

$$M_{em} = F_{em} N \frac{D_a}{2} \quad (1.11)$$

З урахуванням (1.4), (1.10) та (1.11)

$$M_{em} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \quad (1.12)$$

Тобто, враховуючи електромашинну постійну,

$$M_{em} = k \Phi I_a. \quad (1.13)$$

Електромагнітна потужність машини пропорційна електромагнітному моменту та кутовій частоті обертання:

$$P_{em} = M_{em} \omega. \quad (1.14)$$

З урахуванням (1.13) маємо:

$$P_{em} = k \Phi I_a \omega, \quad (1.15)$$

$$P_{em} = E_a I_a. \quad (1.16)$$

Отже, електромагнітна потужність, через яку відбувається взаємне перетворення електричної і механічної потужності, є добутком ЕРС та струму якоря.

1.3 Магнітне поле та реакція якоря машин постійного струму

Крім електричного кола, будь-яка електрична машина має магнітне коло, яке в машині постійного струму складається з п'яти ділянок:

- головний полюс виготовляється з пластин легованої холоднокатаної сталі товщиною 1–1,5 мм;

- повітряний зазор, хоч і має мінімальну довжину, але опір потоку найбільший саме на цій ділянці;

- зубцева зона виділена окремою ділянкою, враховуючи незначний переріз (через наявність пазів), яким замикається магнітний потік;

- спинка якоря, набрана з пластин електротехнічної сталі товщиною 0,35–0,5 мм (пластини для зниження втрат на вихрові струму ізольовані спеціальним лаком);

- ярмо – товстостінна труба, або відливка з чавуну.

Провівши розрахунок магнітного кола машини, визначають параметри обмотки збудження, *магніторушійна сила (МРС)* якої визначається, як сума магнітних напруг на ділянках магнітного кола:

$$F_{o.z.} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + F_a + F_y, \quad (1.17)$$

де F_{δ} , F_z , F_m , F_a , F_y – магнітні напруги повітряного зазору, зубцевої зони, головного полюса, спинки якоря та ярма відповідно.

Варто зазначити: коли машина має компенсаційну обмотку, до магнітного кола вносять шосту ділянку – це зубцева зона основного полюса.

Порядок розрахування полягає у визначенні магнітного потоку полюса при заданому значенні ЕРС обмотки якоря E_a [з (1.7)]:

$$\Phi = \frac{2\pi a E_a}{p N \omega} \quad (1.18)$$

Знаючи магнітний потік, незмінний на всіх ділянках кола (за винятком потоку полюса, який більший від значення Φ на величину потоку розсіяння,

що враховується коефіцієнтом розсіяння), визначають індукцію на кожній ділянці:

$$B_i = \Phi / S_i, \quad (1.19)$$

де B_i і S_i – індукція та площа перерізу i -тої ділянки.

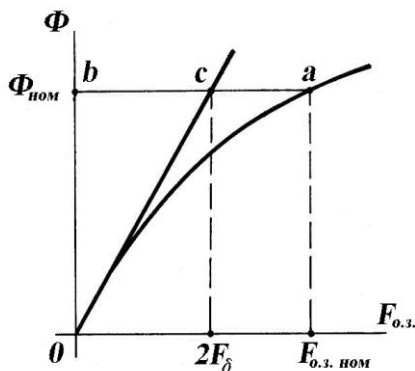


Рисунок 1.6 – Магнітна характеристика

За таблицями чи кривими намагнічування для феромагнітного матеріалу відповідної ділянки визначають напруженість поля H_i , а потім магнітна напруга F_i :

$$F_i = H_i l_i, \quad (1.20)$$

де l_i – довжина відповідної ділянки.

Якщо задатись кількома значеннями потоку, наприклад: $0,5 \Phi_{\text{ном}}$, $0,75 \Phi_{\text{ном}}$, $\Phi_{\text{ном}}$, $1,25 \Phi_{\text{ном}}$, то можна побудувати магнітну характеристику машини (рис. 1.6).

Пряма oc характеризує прямолінійну зміну магнітного потоку в повітряному зазорі. Відношення відрізків av та bc називають коефіцієнтом насичення магнітного кола машини:

$$K_\mu = ab/bc = F_{\text{о.з. ном}} / 2F_\delta \quad (1.21)$$

де $F_{\text{о.з. ном}}$ – номінальна магніторухійна сила, що створюється обмоткою збудження, A .

Для машин постійного струму $K_\mu \approx 1,15$ – $1,35$. Якщо $K_\mu < 1,15$, то в машині буде перевитрата феромагнітного матеріалу (машина працює в ненасиченому режимі), якщо $K_\mu > 1,351$ – перевитрата міді (магнітна система перенасичена).

Під час роботи машини в її магнітній системі створюється обмоткою збудження основний магнітний потік Φ . Якщо машина працює в режимі *холостого ходу* (ХХ), то цей потік буде спрямований по повздовжній осі машини (d) симетрично до неї. На (рис. 1.7, а) цей потік для простоти зображено чотирма магнітними силовими лініями.

При роботі машини під навантаженням струм, протікаючи по обмотці якоря, створює своє поле – *поле якоря*. На рисунку 1.7, б це поле зображене однією магнітною силовою лінією навколо провідника, що замінює в цьому випадку обмотку якоря.

Дія поля якоря на основний магнітний потік машини називається *реакцією якоря*.

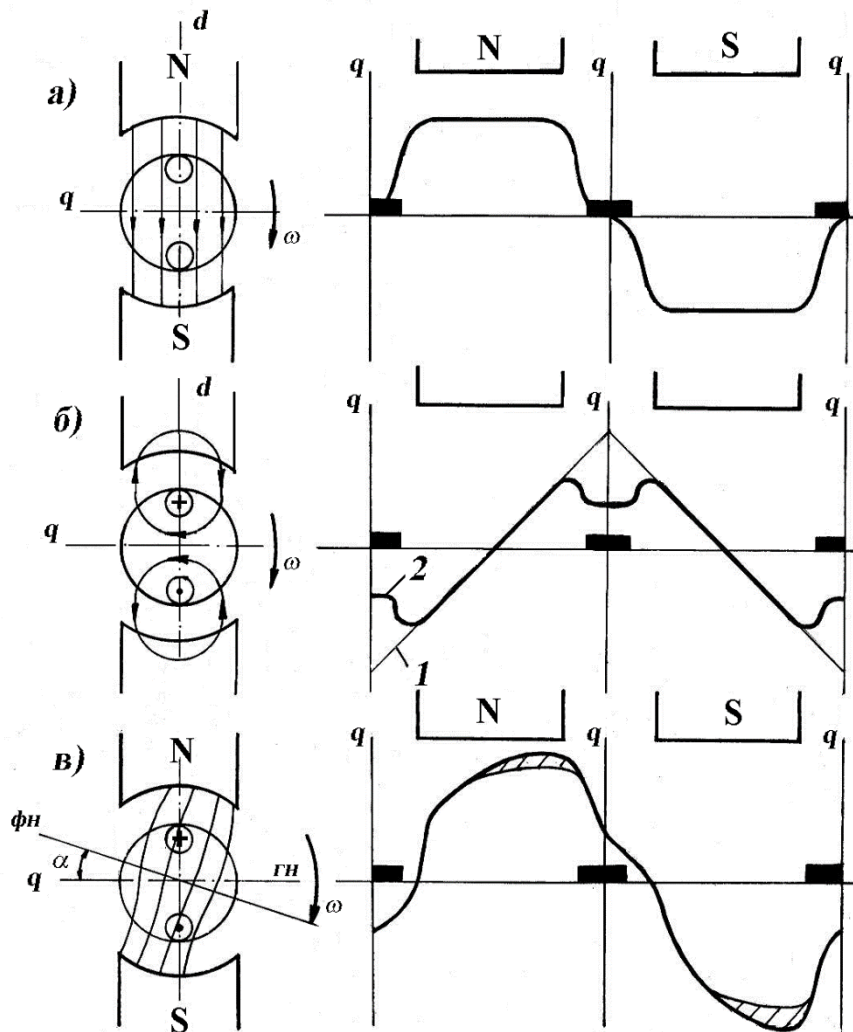


Рисунок 1.7 – Магнітне поле та розподілення магнітної індукції в повітряному зазорі

В результаті реакції якоря магнітне поле викривляється і стає несиметричним відносно осі d , (рис. 1.7, в).

На (рис. 1.7) реакція якоря пояснюється методом суперпозиції:

– (рис. 1.7, а) зображується основне поле при відсутності струму в якорі, а отже, і його поля;

– (рис. 1.7, б) показано визначене за правилом свердлика магнітне поле, що створює виток (обмотка) якоря при відсутності струму збудження (полюси присутні лише як феромагнітний матеріал по осі d). Напрямок струму витка такий, який створила б ЕРС, що наводиться в провідниках (рис. 1.7, а) в режимі генератора при обертанні ротора за годинниковою стрілкою. Розподіл індукції в повітряному зазорі 1 спостерігався б, якщо навколо циліндра якоря був статор циліндричної форми, як, наприклад, в машині змінного струму. У цьому випадку індукція розподіляється по кривій 2, що має «провали» між полюсами;

– (рис. 1.7, в) показано результуюче поле та розподілення індукції в повітряному зазорі, тобто накладання рисунка 1.7, б на рисунок 1.7, а. Зліва під полюсом N та справа під S поле ослабло і, навпаки, справа під N і зліва під S

підсилювалось. «Фізична нейтраль» (*фн*) – лінія, перпендикулярна до ліній поля, змістилась із осі *q* («геометрична нейтраль» – *гн*) на кут α .

Зображені на рисунку 1.7 поле та індукція в повітряному зазорі справедливі лише для машини з ненасиченою магнітною системою. У цьому випадку поле лише викривляється, а результуючий потік не змінюється: на скільки зменшиться потік під *набігаючим* краєм полюса (на одну магнітну силову лінію, рис. 1.7, в), на стільки збільшиться поле під *збігаючим краєм*.

Якщо машина насичена, реакція якоря приведе до зниження результуючого магнітного поля, оскільки один край полюса буде розмагнічуватись, а інший на стільки ж підмагнітитися через насичення системи не зможе. Це зниження відповідає заштрихованим ділянкам на рисунку 1.7, в. Таким чином, реакція якоря призводить не тільки до викривлення основного поля, а й до його зменшення (як правило, машини працюють в насиченому режимі), що негативно позначається на роботі як генератора (знижується ЕРС), так і двигуна (зменшується електромагнітний момент).

Варто зазначити, що рисунок 1.7 демонструє реакцію якоря при роботі машини в режимі генератора. Але цей же рисунок буде відображати реакцію якоря двигуна, якщо змінити напрям обертання ротора (в цьому випадку проти годинникової стрілки).

При зміщенні щіток із геометричної нейтралі наслідки реакції якоря змінюються. При цьому основний магнітний потік може як ослаблятися, так і підсилюватися.

Щоб позбутися шкідливого впливу реакції якоря на машину, при проектуванні застосовують один із двох засобів.

Перший – застосування компенсаційної обмотки. Така обмотка розташовується в пазах полюсних наконечників, вмикається послідовно з обмоткою якоря, і струм, що по ній протікає, створює м. р. с., яка спрямована назустріч м. р. с., що створює якір і автоматично компенсує її. Застосування компенсаційної обмотки робить більшою вартість машини, тому її застосовують лише в потужних машинах 150–500 кВт при $U > 440$ В.

Другий – збільшення повітряного зазору між якорем та краями головних полюсів. У цьому випадку машина буде насичена лише по осі полюсів, де повітряний зазор мінімальний, а край кожного полюса ненасичений і допускає зростання потоку при реакції якоря. Цей спосіб значно знижує розмагнічувальну дію реакції якоря, але недоліком його є необхідність збільшувати намагнічувальну силу обмотки збудження.

1.4 Комутація в машинах постійного струму

Наявність колектора в машині постійного струму ускладнює не тільки конструкцію машини, але й процес її експлуатації. Це пов'язано з тим, що колектор і щітки виконують роль перетворювача струму із змінного на постійний (генератор) та, навпаки, із постійного в змінний (двигун). Під час роботи машини секції обмотки якоря, з'єднані послідовно в паралельні вітки,

перемикаються з однієї паралельної вітки в іншу. Процес такого перемикання і пов'язані з ним явища, що відбуваються в секціях, які перемикаються, а також між щітками і колектором, називається *комутацією*.

Секція, кінці якої з'єднані з колекторними пластинами, що замикаються щітками, називається *комутованою секцією*.

Час, за який відбувається комутація в секції, і щітка повністю переходить з однієї колекторної пластини на іншу, називається *періодом комутації*, T_k .

Враховуючи незначну ширину колекторної пластини і досить значні частоти обертання, можна зробити висновок, що період комутації є дуже малою величиною, складає лише тисячні частки секунди.

Перемикання секції з однієї паралельної вітки на іншу супроводжується зміною струму в секції на протилежний і замиканням секції накоротко, тому може спричинити *іскріння* між щіткою і колекторною пластиною, де таке замикання (розмикання) відбувається. Величина та інтенсивність іскріння залежить від досить багатьох факторів і причин, основними з яких є такі:

- *механічні причини* – слабкий тиск щіток на колектор, еліптичність або негладка поверхня колектора, забруднення поверхні колектора, міканітова ізоляція виступає над мідними пластинами, слабе закріплення траверзи, пальців чи щіткотримачів, а також інші причини, які спричиняють порушення електричного контакту між щіткою і колектором;

- *потенційні причини* іскріння виникають при перевищенні допустимого значення напруги між суміжними колекторними пластинами, що найбільш небезпечно, оскільки може привести до виникнення електричної дуги;

- *комутаційні причини* іскріння створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині при перемиканні секції з однієї паралельної вітки на іншу.

Зазвичай іскріння зумовлюється всіма цими факторами одночасно.

На заводі, де виготовляється машина, в ній налаштовують *темну комутацію*, що виключає будь-яке іскріння. Але в процесі роботи машини колектор і щітки зношуються, що може привести до появи іскріння. Якщо іскріння незначне, то робота машини можлива. В цілому, іскріння під збігаючим краєм щітки оцінюють ступенем іскріння (класом комутації).

Ступінь 1 – іскріння відсутнє (темна комутація).

Ступінь $1\frac{1}{4}$ – слабке іскріння під незначною частиною щітки, яке не спричиняє почорніння колектора і появу нагару на щітках.

Ступінь $1\frac{1}{2}$ – слабке іскріння під значною частиною щітки, що спричиняє сліди почорніння на колекторі, які легко стирається з поверхні колектора за допомогою бензину чи іншого розчинника, а також сліди нагару на щітках.

Ступінь 2 – іскріння під всією щіткою. Робота машини допускається тільки при короткочасних поштовхах навантаження і при перевантаженні. Це призводить до появи слідів почорніння на колекторі, яке не зникає після протирання колектора бензином, і до появи нагару на щітках.

Ступінь 3 – значне іскріння під всією щіткою з появою іскор, що вилітають з-під щітки. Таке іскріння призводить до значного почорніння, яке

можна зняти лише за допомогою наждачної шкірки, а також до підгоряння і руйнування щіток. Допускається тільки під час прямого (безреостатного) пуску або реверсування, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, що дозволяє подальшу роботу.

Складність процесів комутації не дозволяють розглядати її в загальному вигляді. Тому для отримання аналітичних і графічних залежностей, що пояснюють комутацію, допускають, що ширина щітки рівна колекторній поділці; щітки розміщені на геометричній нейтралі; електричний опір комutowаної секції і місць її приєднання до колектора порівняно з опором перехідного контакту «щітка – колектор» настільки малий, що ним можна знехтувати (зазвичай таке співвідношення відповідає дійсності).

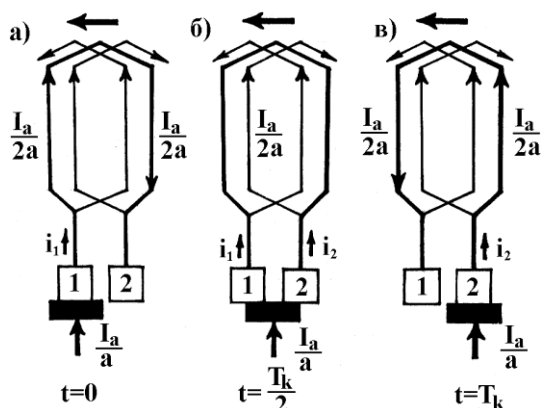


Рисунок 1.8 – Перехід комutowаної секції з однієї паралельної вітки в другу

На початку комутації (рис. 1.8, а) комutowана секція, виділена більш жирною лінією, увімкнена в праву паралельну вітку і струм в ній $I_a/2a$ протікає за напрямом годинникової стрілки.

У процесі комутації щітка поступово збігає з пластини 1 і набігає на пластину 2, в результаті чого секція виявляється закороченою і струм в ній зменшується до нуля, коли щітка рівномірно перекриває обидві пластини ($t = T_k/2$). Після закінчення

комутації ($t = T_k$) щітка повністю переходить на колекторну пластину 2, і, як наслідок, комutowана секція перемикається в ліву паралельну вітку, струм у ній знову стає рівним $I_a/2a$, але напрям струму змінився на протилежний.

Отже, протягом періоду комутації струм у комutowаній секції змінюється на протилежний, а його величина за абсолютним значенням залишається незмінною.

Якщо графіком зміни струму в комutowаній секції за період комутації є пряма лінія, то комутацію називають *прямолінійною* (рис. 1.9, а). Таку комутацію ще називають *ідеальною*, тому що перехід щітки з однієї колекторної пластини на іншу відбувається без іскріння на колекторі.

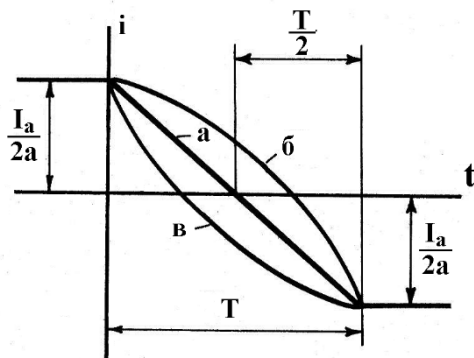


Рисунок 1.9 – Графік змінювання струму за період комутації

Фізично це можна пояснити тим, що густина струму в контакті «щітка – пластина» за весь період комутації залишається незмінною, тому струм через першу пластину знижується, а через другу зростає пропорційно до площі перекриття пластини. Таким

чином, при $t = T_k/2$ струми через обидві колекторні пластини, що закорочують

секцію, рівні, а в самій закороченій секції струм дорівнює нулю. В кінці комутації, коли щітка відривається від пластини 1, струм через неї зменшується до нуля, площа дотику пластини і щітки дорівнює нулю, а отже, відсутнє і іскріння. Незмінність густини струму в контакті «щітка – пластина» може бути лише за умови, коли в комутованій секції не наводиться ЕРС або сума ЕРС, що наводяться, дорівнює нулю:

$$\sum e_c = 0, \quad (1.22)$$

де e_c – ЕРС, що наводяться в комутованій секції.

Розглянемо тепер, які ЕРС будуть створюватися в комутованій секції і як вони впливають на процес змінювання струму в секції зокрема і на комутацію в машині взагалі.

У сучасних машинах, як уже зазначалося, період комутації дуже малий, тому швидкість змінювання струму в часі досить значна, а це призводить до появи ЕРС, які зумовлені зміною струму.

Враховуючи, що секція обмотки має *індуктивність* L_c , при змінюванні струму в ній буде виникати ЕРС самоіндукції:

$$e_L = -L_c di/dt, \quad (1.23)$$

де i – струм в комутованій секції.

Зазвичай у кожному пазу якоря розташовано кілька активних сторін різних секцій. При цьому, враховуючи, що крок обмотки ($y_1 = \tau$) повний, у кожній із цих секцій, своєю чергою, буде відбуватися комутація, а це призведе до появи змінного магнітного потоку кожної із цих сторін і, як наслідок, до появи ЕРС взаємоіндукції:

$$e_M = -M_c di/dt, \quad (1.24)$$

де M_c – взаємоіндуктивність секцій, що комутуються одночасно.

При положенні щіток на геометричній нейтралі машини і при відсутності додаткових полюсів в зоні секцій, що комутуються, магнітна індукція буде мати (внаслідок реакції якоря) деяке значення $B_{p.я}$. Під дією цієї індукції в комутованій секції буде створюватися ще одна ЕРС, так звана ЕРС *крутіння*:

$$e_k = B_{p.я} \cdot 2l W_s v, \quad (1.25)$$

де l – довжина пазових (активних) частин секції; W_s – число витків у секції; v – лінійна швидкість руху секції.

Перші дві ЕРС, e_L та e_M , згідно з правилом Ленца, завжди спрямовані назустріч зміні струму, тому їх суму ще називають реактивною ЕРС:

$$e_p = e_L + e_M = -(L_c + M_c) di/dt. \quad (1.26)$$

Ця ЕРС завжди буде *уповільнювати* зміну струму, змінити її напрям неможливо. ЕРС крутіння, на відміну від реактивної, може мати різні напрями залежно від полярності поля в зоні комутації. Якщо додаткові полюси в машині

відсутні і щітки розташовані на геометричній нейтралі, то напрям e_K співпадає з напрямом e_p . У цьому випадку в контурі комутованої секції діє сума ЕРС:

$$\Sigma e = e_K + e_p, \quad (1.27)$$

тому загальний струм комутованої секції потрібно розглядати, як суму двох струмів:

$$i = i_{np} + i_o \quad (1.28)$$

де i_{np} – струм, що становить струм прямолінійної комутації;

i_o – додатковий струм, який виникає внаслідок дії в комутованій секції ЕРС e_p та e_K .

$$i_o = \Sigma e / (R_1 + R_2), \quad (1.29)$$

де R_1 і R_2 – відповідно, опори контактів «щітка – пластина 1» та «щітка – пластина 2».

Додатковий струм призводить до зміни густини струмів через колекторні пластини, що замикаються щіткою. За умов, що розглядаються, густина струму під збігаючим краєм щітки буде зростати, а під набігаючим – зменшуватися, тому що додатковий струм спрямований проти зміни струму прямолінійної комутації, уповільнюючи його зміну і перетворюючи прямолінійну комутацію в криволінійну уповільнену (рис. 1.9, б). В середині такої комутації струм в комутованій секції не дорівнює нулю, як при прямоліній, а дорівнює i_o . Щоб цей струм знизився до нуля, необхідний якийсь час, наприклад, $2/3 T$. Тоді за $1/3 T$, що залишається, струм повинен зростати до $I_a/2a$ в протилежному напрямі, що й приводить до підвищення його густини під збігаючим краєм. Коли щітка відривається від колекторної пластини, значення струму ще не дорівнює нулю, тому енергія, яка при цьому виділяється, витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і збігаючою колекторною пластиною. Як зрозуміло із (1.29), іскріння під збігаючим краєм щітки буде тим більшим, чим більша індуктивність секції і додатковий струм комутації. Отже, для поліпшення комутації потрібно знижувати індуктивність секції (наприклад, зниження кількості витків) або, що ефективніше, зниження додаткового струму.

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму – додатковий струм комутації:

$$i_o = \Sigma e / \Sigma R_K, \quad (1.30)$$

де ΣR_K – сума електричних опорів, якими замикається додатковий струм: опори секції, місць пайки в півниках колекторних пластин, перехідного контакту між колекторними пластинами і щіткою і, нарешті, самої щітки.

Отже, щоб знизити додатковий струм, необхідно або знизити Σe , або підвищити ΣR_k . Звідси випливає декілька способів поліпшення комутації.

Вибір щіток. З точки зору забезпечення задовільної комутації раціонально використовувати щітки з великим опором $R_{щ}$. Однак допустима густина струму в таких щітках незначна, що веде до збільшення розміру як щітки, так колектора і додаткових витрат міді. Тому такі щітки використовують лише в машинах високої напруги з незначним робочим струмом. У машинах постійного струму використовують графітні, електрографітовані, вугільно-графітні та мідно-графітні щітки. Вибирають щітки відповідно до рекомендацій, розроблених на основі багатолітнього досвіду проектування та експлуатації машин постійного струму.

Найбільш широко застосовують в машинах постійного струму з напругою 110–440 В електрографітовані щітки. Збільшенню перехідного опору, а отже, і поліпшенню комутації, сприяє *політура* колектора – тонка оксидна плівка на поверхні колектора, що має підвищений електричний опір.

Зменшення реактивної ЕРС. Суттєвий вплив на сумарну ЕРС в комутованій секції має реактивна ЕРС $e_p = e_L + e_M$. ЕРС взаємоіндукції e_M значною мірою залежить від ширини щітки: чим ширша щітка, тим більше пластин вона водночас перекриває, а отже, більше секцій одночасно комутуються і тим більша ЕРС взаємоіндукції e_M . Однак вузькі щітки не бажані через малу механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контакту потрібно збільшувати довжину щітки, а це приведе до збільшення і довжини колектора. Найбільш раціональна ширина щітки – 2–3 колекторні поділки.

Тип обмотки також значно впливає на величину ЕРС взаємоіндукції. Наприклад, якщо обмотка має укорочений крок ($y_1 < \tau$), то активні сторони секції, що комутуються одночасно, виявляться в різних пазах і це значно знизить ЕРС взаємоіндукції.

Зниження реактивної ЕРС або її повна компенсація можливі за умови створення в зоні комутації (по осі щіток) магнітного поля відповідної полярності і величини.

Створюється таке поле за допомогою додаткових полюсів або зсуву щіток із геометричної нейтралі.

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб цим полем в комутованій секції створювалася така ЕРС крутіння e_k , яка б компенсувала реактивну ЕРС e_p .

У машині додаткові полюси розміщують між основними, щітки при цьому установлюють на геометричній нейтралі. Всі машини постійного струму з потужністю понад 1 кВт мають додаткові полюси, кількість яких така сама, як і основних, або в два рази менша.

Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі при наявності додаткових полюсів зображений на рисунку 1.10.

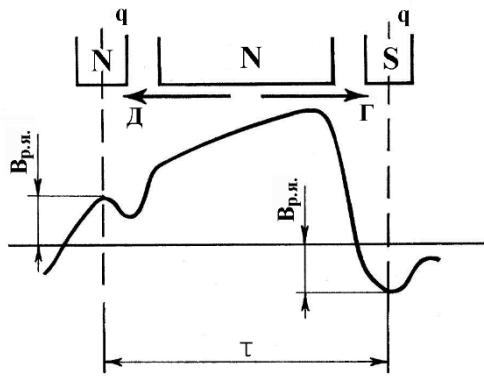


Рисунок 1.10 – Результуюче магнітне поле в повітряному зазорі машини з додатковими полюсами в режимі генератора (Г) і двигуна (Д)

Якщо МРС додаткових полюсів зробити більшою, ніж потрібно для компенсації ЕРС e_p , тобто коли e_k стане більшою, ніж e_p , то сумарна ЕРС змінить свій знак, а додатковий струм комутації змінить свій напрям на протилежний порівняно з тим, який він мав при криволінійній уповільненій комутації (рис. 1.9, б). У цьому випадку графік зміни струму в комутуваній секції набуде такого вигляду (рис. 1.9, в), тобто комутація стане *криволінійною прискореною*. При такій комутації струм в комутуваній секції досягне нульового значення за час $t < T_k/2$, а це призведе до зниження густини струму під збігаючим краєм щітки та підвищення під набігаючим і, як наслідок, іскріння під

набігаючим краєм щітки. Варто зазначити, що іскріння під набігаючим краєм щітки є більш небезпечним для експлуатації машини, ніж іскріння збігаючого краю щітки, тому що іскри набігаючого краю затягуються під щітку, іонізують простір між щіткою і пластиною, що збільшує ступінь іскріння.

Для забезпечення безіскрової роботи машини обмотка додаткових полюсів повинна бути розрахована на таку МРС, яка б забезпечила компенсацію реактивної ЕРС в комутуваній секції. Щоб така компенсація забезпечувалася при будь-яких навантаженнях, обмотку додаткових полюсів вмикають послідовно з обмоткою якоря.

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині лише в межах номінального навантаження. При перевантаженнях додаткові полюси перенасичуються, що, в кінцевому результаті, призводить до уповільнення комутації.

Отримання комутаційного поля шляхом зміщення щіток. У машинах постійного струму з потужністю до 1 кВт, що виготовляються без додаткових полюсів, комутаційне поле створюють за допомогою зсуву щіток з геометричної нейтралі за фізичну за напрямом обертання машини, яка працює в режимі генератора, і проти напрямку обертання – в режимі двигуна.

При такому зсуві можна вибрати точку, в якій при такому навантаженні комутаційне поле буде забезпечувати компенсацію реактивної ЕРС і безіскрову роботу машини.

Недоліки цього способу поліпшення комутації:

- при зміні навантаження необхідно змінювати положення щіток;
- зсув щіток з геометричної нейтралі підсилює розмагнічувальну дію реакції якоря;
- при реверсуванні машини зсув щіток неможливий, оскільки відбувається зміна напрямку обертання;
- потребує зміни і напрямку зсуву щіток.

1.5 Рівняння генераторів постійного струму

Основні співвідношення між величинами, що характеризують роботу машини як генератора, можна виразити у вигляді рівнянь. Для загальної точки ланцюга якоря, обмотки збудження та опору навантаження рівняння складаються за першим законом Кірхгофа для генераторів різних способів збудження. Рівняння ЕРС справедливе для генераторів незалежно від способу збудження. Це рівняння складається на основі другого закону Кірхгофа для контуру генератора, до якого входить обмотка якоря та навантаження. ЕРС, що створюється в якорі, E_a урівноважується падінням напруги на опорі елементів, увімкнених послідовно з обмоткою якоря, та на опорі навантаження:

$$E_a = I_a R_a + IR_n, \quad (1.31)$$

тут

$$R_a = R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{к.о}} + R_c + R_{\text{щ}}, \quad (1.32)$$

де $R_{\text{я}}$ – опір безпосередньо обмотки якоря; $R_{\text{д}}$ – опір обмотки додаткових полюсів; $R_{\text{к.о}}$ – опір компенсаційної обмотки; R_c – опір послідовної обмотки збудження; $R_{\text{щ}}$ – опір контакту «щітка – колектор». Варто зазначити, що деякі з цих опорів можуть бути відсутні в генераторах різних типів у разі відсутності відповідних елементів. Падіння напруги на опорі навантаження IR_n зазвичай називають *напругою генератора* U , отже,

$$E_a = U + I_a R_a. \quad (1.33)$$

Ця ЕРС зумовлює появу струму якоря:

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_a}, \quad (1.34)$$

Суттєве значення має *рівняння рівноваги моментів*, що діють у генераторі. В режимі ХХ (робота машини при відсутності навантаження) момент привідного двигуна M_1 незначний і зумовлений гальмівними моментами від сил тертя і вихрових струмів в залізі якоря. Цей момент називають *моментом холостого ходу*, M_0 .

Під час роботи навантаженого генератора на його якорі діє електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$ (1.13), який також спрямований назустріч моменту привідного двигуна. Якщо частота обертання незмінна ($n = \text{const}$), обертовий момент привідного двигуна урівноважується в режимі ХХ моментом M_0 , а при навантаженні – сумою протидіючих моментів: моментом ХХ M_0 і електромагнітним моментом $M_{\text{ем}}$, тобто:

$$M_1 = M_0 + M_{\text{ем}}. \quad (1.35)$$

Якщо обидві частини рівняння (1.35) помножити на кутову частоту обертання ω , отримаємо рівняння рівноваги потужностей:

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (1.36)$$

де $P_1 = M_1 \omega$ – механічна потужність, що підводиться до генератора від привідного двигуна; $P_0 = M_0 \omega$ – потужність, що підводиться до генератора в режимі ХХ, тобто *втрати ХХ* ніякої корисної роботи при ХХ генератор не виконує; $P_{em} = M_{em} \omega$ – електромагнітна потужність, яка, згідно з (1.16), може виражатись і як добуток ЕРС та струм якоря. Для генератора з паралельним збудженням будемо мати:

$$P_{em} = (U + I_a R_a) (I + I_z) = UI + UI_z + I_a^2 R_a = P_2 + P_z + P_{ea}, \quad (1.37)$$

де $P_2 = UI$ – корисна електрична потужність генератора; $P_z = UI_z$ – потужність, що затрачається на збудження – *втрати в обмотці збудження*; $P_{ea} = I_a^2 R_a$ – електричні втрати на всіх елементах, що послідовно увімкнені в коло якоря, враховуючи втрати в контакті «щітка – колектор».

Підставивши (1.37) в (1.36) і враховуючи, що

$$P_0 = P_{mex} + P_{mag}, \quad (1.38)$$

де P_{mex} – механічні втрати, зумовлені силами тертя та вентиляції; P_{mag} – втрати магнітні на вихрові струми та гістерезис (перемагнічення) пластин якоря, отримаємо:

$$P_1 = P_2 + P_{mex} + P_{mag} + P_{ea} + P_z + P_{доод}. \quad (1.39)$$

Це рівняння і є рівнянням балансу потужностей генератора з самозбудженням, у ньому $P_{доод} = 1-2\%$ від $P_{ном}$ – додаткові втрати, які важко врахувати, і тому задають у відсотках від номінальної потужності.

1.6 Характеристики генераторів постійного струму незалежного, паралельного, послідовного та змішаного збудження

Спосіб збудження генераторів визначає їх властивості, які простіше виражаються графічним шляхом, тобто у вигляді кривих, так званих *характеристик генераторів*.

Генератор незалежного збудження. Схема увімкнення генератора незалежного збудження показана на рисунку 1.11. Реостат R_{pz} , увімкнений в коло збудження, дозволяє змінювати струм збудження I_z , а отже, і основний магнітний потік машини. Джерелом збудження може бути акумулятор, випрямляч чи інший генератор постійного струму, який в цьому випадку називають *збуджувачем*.

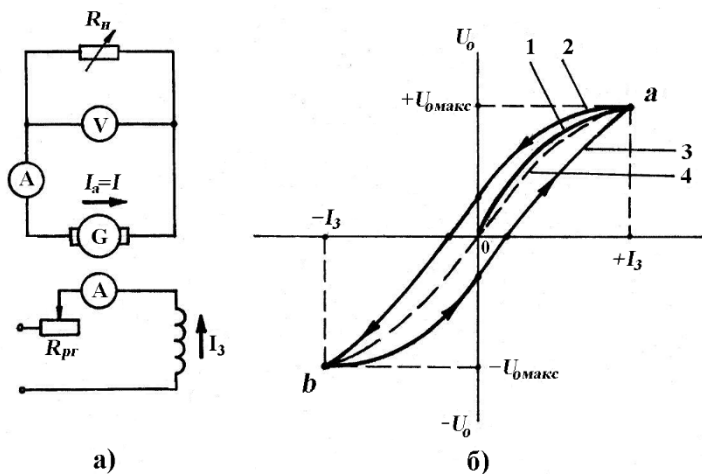


Рисунок 1.11 – Принципова схема (а) і характеристика ХХ (б) генератора незалежного збудження

Характеристика холостого ходу. Цю характеристику знімають в режимі ХХ ($I_a = 0$). Генератор приводять до обертання з номінальною частотою, яку підтримують незмінною протягом всього дослід. Поступово збільшують струм збудження I_z від нуля до значення, при якому напруга $U = 1,15 U_{ном}$. Отримують дані для побудови кривої 1 (рис. 1.11, б).

Початкова ордината кривої 1 не дорівнює 0, що пояснюється дією незначного магнітного потоку *залишкового магнетизму*, який зберігся від попереднього намагнічування. Зменшивши струм збудження до нуля, а потім змінивши його напрям на протилежний, отримують криву 2, що називається *низхідною віткою* характеристики.

Низхідна вітка проходить вище, ніж крива 1, що пояснюється зростанням залишкового намагнічування. Надалі дослід проводять у зворотному напрямі: зменшуючи струм збудження від I_z до 0, а потім збільшуючи до $+I_z$, отримують *висхідну вітку* характеристики 3. Низхідна та висхідна вітки утворюють *петлю гістерезису*. *Розрахункова характеристика ХХ* 4 становить середню лінію між кривими 2 і 3.

Прямолінійна частина характеристики ХХ відповідає ненасиченій магнітній системі машини. Точка номінальної напруги генератора лежить на середньонасиченій частині характеристики. Збільшення струму збудження більше за значення $I_{зоном}$, який створює при ХХ номінальну напругу $U_{ном}$, перенасичує магнітну систему і спотворює характеристику.

Якщо струм навантаження не дорівнює нулю, наприклад, $I = I_{ном}$, то він буде мати навантажувальну характеристику, крива якої буде проходити нижче, ніж характеристика ХХ. При цьому відстань між кривими характеристик ХХ і навантажувальною буде збільшуватися при збільшенні струму збудження (рис. 1.12, а).

Зовнішня характеристика генератора.

Ця характеристика становить залежність $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ та $R_z = \text{const}$. Дані для її побудови знімають так. Генератор навантажують до номінального струму при номінальній напрузі, потім зменшують навантаження

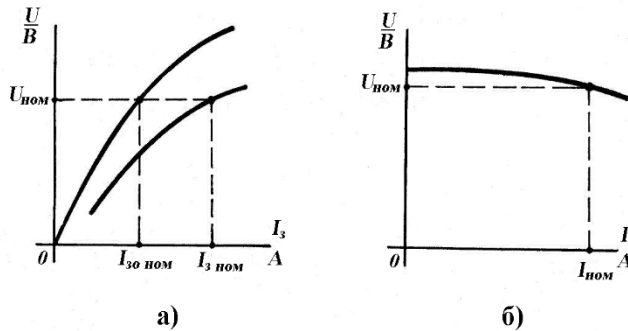


Рисунок 1.12 – Навантажувальна (а) та зовнішня (б) характеристики генератора незалежного збудження

і записують покази приладів, за отриманими даними будують криву (рис. 1.12, б). Зменшення напруги при зростанні навантаження пояснюється падінням напруги в колі якоря та розмагнічувальною дією реакції якоря. Нахил характеристики до осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною $\Delta U_{\text{ном}}$:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 [\%]. \quad (1.40)$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження $\Delta U_{\text{ном}} = 5\text{--}10\%$.

Регулювальна характеристика. Характеристика $I_z = f(I)$ показує, як треба змінити струм збудження, щоб при зміні навантаження напруга залишалася незмінною.

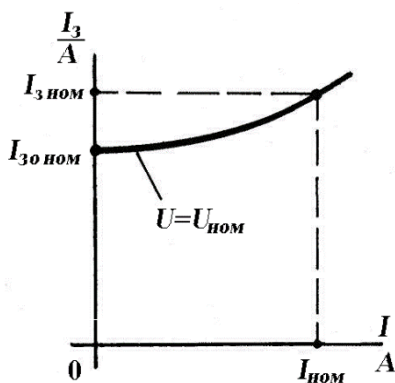


Рисунок 1.13 – Регулювальна характеристика генератора незалежного збудження

Збудивши генератор струмом $I_{\text{зоном}}$ при ХХ до значення напруги $U_{\text{ном}}$, навантажують генератор і одночасно збільшують струм збудження, підтримуючи напругу незмінною (рис. 1.13).

Генератори незалежного збудження мають задовільні характеристики, недоліком цих генераторів є необхідність мати стороннє джерело живлення.

Генератор паралельного збудження. Зазначеного вище недоліку позбавлені генератори з самозбудженням, одним із яких є генератор паралельного збудження (його схема зображена на рис. 1.14, а).

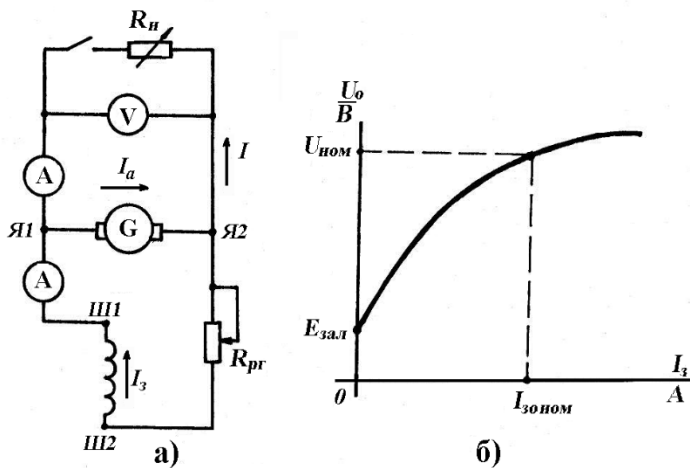


Рисунок 1.14 – Принципова схема (а) та характеристика XX (б) генератора паралельного збудження

Принцип самозбудження генератора з самозбудженням базується на тому, що намагнічена магнітна система машини довго зберігає незначний залишковий магнітний потік $\Phi_{зал} \approx 2-3\%$ від $\Phi_{ном}$. При обертанні якоря $\Phi_{зал}$ індукуює в його обмотці ЕРС $E_{зал}$, під дією якої по обмотці збудження протікає незначний струм $I_{зал}$. Якщо магнітний потік, що створюється цим струмом, співпадає за напрямом з $\Phi_{зал}$, то

ЕРС якоря буде зростати, відповідно, буде зростати і струм збудження. Цей процес буде відбуватися доти, доки магнітна система не насититься. Процес самозбудження не буде відбуватися, якщо опір кола збудження буде більшим, ніж критичний, при якому збудження неможливе, а частота обертання меншою, ніж критична. Характеристика XX такого генератора представлена на рисунку 1.14, б. При струмі збудження, що дорівнює нулю, напруга дорівнює $E_{зал}$ – ЕРС, що створюється залишковим потоком.

Зовнішня характеристика такого генератора м'якша від зовнішньої характеристики генератора незалежного збудження. Це зумовлено тим, що зниження напруги на затискачах генератора від падіння напруги в колі якоря та розмагнічувальної дії реакції якоря, призводить до зниження струму збудження, а отже, і ЕРС, що створюється в обмотці якоря (рис. 1.15, б).

Падіння напруги в генераторі паралельного збудження доки машина насичена відносно незначне, до навантаження $I_{кр}$. Далі машина переходить в ненасичений стан і напруга різко падає до нуля. Струм к.з. I_k буде незначним, зумовленим ЕРС $E_{за}$.

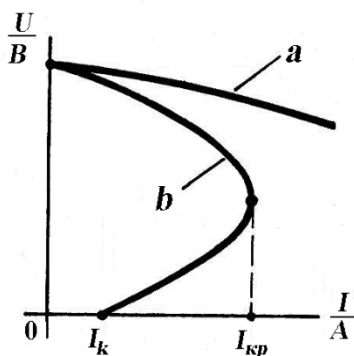


Рисунок 1.15 – Зовнішні характеристики генератора незалежного (а) та паралельного (б) збудження

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, оскільки відсутність збуджувача вигідно відрізняє їх від генераторів незалежного збудження. Номінальне падіння напруги такого генератора становить 10–30 %. **Генератор змішаного збудження** (рис. 1.16, а) має паралельну та послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється здебільшого паралельною обмоткою. Послідовна обмотка, як правило, вмикається так, щоб м.р.с. обмоток склалися, що забезпечує жорстку зовнішню характеристику генератора.

В режимі ХХ генератор має лише паралельне збудження, $I = 0$. При появі навантаження потік послідовної обмотки збудження компенсує падіння напруги в якорі та розмагнічувальну дію реакції якоря і зовнішня характеристика змінюється по кривій 2 (рис. 1.16, б). При збільшенні кількості витків послідовної обмотки можна отримати незмінну напругу на кінцях лінії, (компенсується падіння напруги в лінії) крива 1 (рис. 1.16, б).

Якщо обмотки генератора увімкнути *назустріч*, то зовнішня характеристика стане досить м'якою, крива 3, що дає змогу використати такий генератор в електрозварювальних пристроях постійного струму.

Генератори змішаного збудження з погодженим увімкненням обмоток застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли необхідно мати незмінну напругу в лінії.

Обмотка збудження генератора послідовного збудження увімкнена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням, тому напруга такого генератора різко змінюється зі зміною навантаження. На практиці такі генератори, як джерело постійного струму, не використовують, тому що до генераторів завжди ставлять вимогу підтримки незмінності напруги, чого не може забезпечити генератор послідовного збудження.

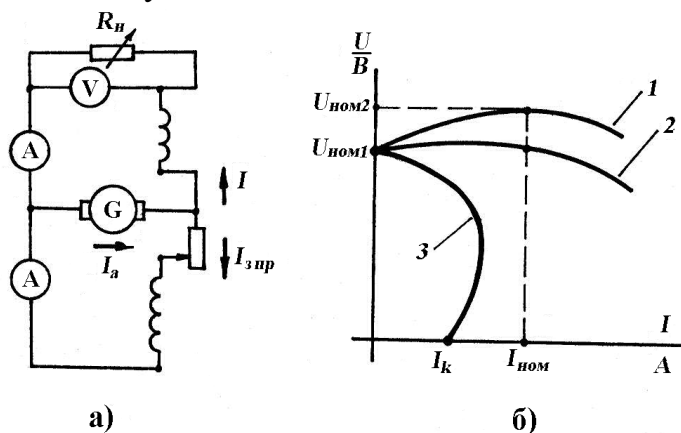


Рисунок 1.16 – Принципова схема (а) та зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

1.7 Рівняння двигунів постійного струму

Для двигунів постійного струму, як і для генераторів, складають рівняння струмів, напруг, моментів та балансу потужностей.

Рівняння струмів, згідно з першим законом Кірхгофа, складають для двигунів паралельного та змішаного збудження. Двигун із послідовним збудженням має однакові струми в обмотках якоря і збудження:

$$I = I_a = I_z, \quad (1.41)$$

де I – струм навантаження, тобто, струм, що споживається з мережі;

I_a ; I_z – струми обмоток якоря та збудження відповідно.

Рівняння струмів двигунів паралельного і змішаного збудження аналогічні:

$$I = I_a + I_z \quad (1.42)$$

та

$$I = I_a + I_{z\text{ пр}}, \quad (1.43)$$

де $I_{z\text{ пр}}$ – струм збудження паралельної обмотки збудження.

Як відомо, при обертанні якоря в його обмотці буде створюватись ЕРС E_a . Можна переконатися, що вона спрямована назустріч струму якоря I_a , тому її ще називають *протиелектрорушійною силою (проти ЕРС)*. Отже, за другим законом Кірхгофа для контуру «мережа – обмотка якоря» маємо:

$$U - E_a = I_a R_a, \quad (1.44)$$

де U – напруга мережі, прикладена до обмотки якоря; R_a – як і у генератора, електричний опір усіх послідовно ввімкнених в коло якоря елементів, включаючи опір контакту «щітка – колектор».

Вираз (1.44) зазвичай представляють у вигляді

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (1.45)$$

який і є рівнянням напруги двигуна незалежно від способу його збудження.

Помноживши праву та ліву частини рівняння напруг на струм якоря I_a , отримаємо:

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a, \quad (1.46)$$

де UI_a – потужність, що підводиться до обмотки якоря з мережі; $E_a I_a$ – електромагнітна потужність, що чисельно дорівнює сумарній механічній потужності, яка створюється в двигуні $E_a I_a = M_{em} \omega$; $I_a^2 R_a$ – електричні втрати на елементах, увімкнених у коло якоря, зокрема і втрати в контакті «щітка – колектор».

Електромагнітний момент M_{em} , що створюється в двигуні, на відміну від аналогічного моменту в генераторі, є обертовим – саме він обертає не лише ротор двигуна, а й те механічне навантаження, що з'єднане з валом ротора. Тому рівняння моментів для режиму двигуна при $\omega = \text{const}$ буде мати такий вигляд:

$$M_{em} = M_2 + M_o, \quad (1.47)$$

де M_2 – момент механічного навантаження на валу; M_o – момент холостого ходу.

Якщо рівняння моментів (1.47) помножити на частоту обертання (враховуючи, що $\omega = \text{const}$), то отримаємо:

$$P_{em} = P_2 + P_o, \quad (1.48)$$

де P_2 – механічна потужність на валу; P_o – як і у генератора, втрати ХХ згідно з (1.38) дорівнюють сумі механічних P_{mex} та магнітних P_{mag} втрат. Підставивши (1.48) в (1.46), отримаємо:

$$UI_a = P_2 + I^2 R_a + P_{mex} + P_{mag}. \quad (1.49)$$

Це рівняння і є рівнянням балансу потужностей.

На основі рівняння балансу потужностей будують *енергетичну діаграму* двигуна постійного струму, яка показує, як відбувається процес перетворення електричної потужності в механічну та які при цьому відбуваються втрати (рис. 1.17).

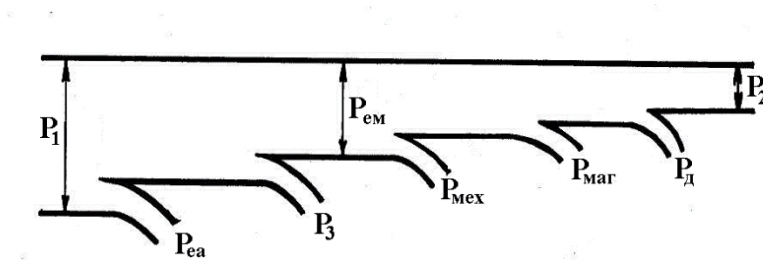


Рисунок 1.17 – Енергетична діаграма двигуна постійного струму

Відповідно до (1.8) кутову частоту обертання двигуна можна виразити, як

$$\omega = \frac{E_a}{k\Phi} \quad (1.50)$$

або, враховуючи (1.45),

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{k\Phi}. \quad (1.51)$$

1.8 Характеристики двигунів постійного струму паралельного, послідовного та змішаного збудження

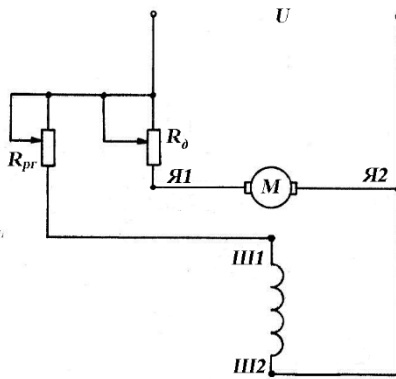


Рисунок 1.18 – Принципова схема двигуна паралельного збудження

Принципова схема двигуна **паралельного збудження** представлена на рисунку 1.18.

В коло обмотки якоря вмикають додатковий опір R_d , який обмежує пусковий струм при реостатному пуску і дає змогу змінювати частоту обертання двигуна при заданому навантаженні. Регулювальний опір в колі обмотки збудження дозволяє знизити струм збудження, а отже, і магнітний потік.

Для отримання аналітичного виразу швидкісної характеристики $\omega = f(I_a)$ перетворимо вираз (1.51):

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{\kappa \Phi} = \frac{U}{\kappa \Phi} - \frac{R_a}{\kappa \Phi} I_a = \omega_0 - \Delta\omega, \quad (1.52)$$

де ω_0 – кутова частота обертання ідеального холостого ходу;

$\Delta\omega$ – зміна кутової частоти обертання, спричинена зміною навантаження на валу двигуна. З виразу (1.52) легко отримати аналітичний вираз механічної характеристики, підставивши в нього із (1.13) значення струму якоря:

$$I_a = \frac{M_{ем}}{\kappa \Phi}. \quad (1.53)$$

Отримаємо:

$$\omega = \frac{U}{\kappa \Phi} - \frac{R_a}{\kappa^2 \Phi^2} M_{ем} = \omega_0 - \Delta\omega \quad (1.54)$$

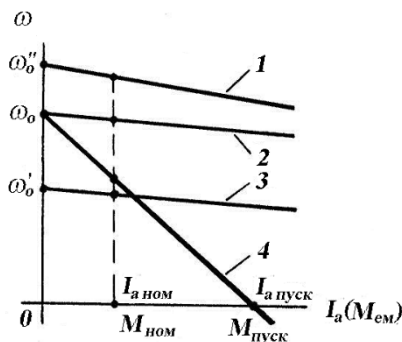


Рисунок 1.19 – Швидкісні (механічні) характеристики двигуна паралельного збудження

Якщо знехтувати реакцією якоря, то, оскільки $I_3 = \text{const}$, можна прийняти, що $\Phi = \text{const}$. Тоді швидкісні (механічні) характеристики становлять прямі лінії, нахилені до осі абсцис (рис. 1.19).

Кут нахилу будь-якої з цих характеристик визначається співвідношенням між опором кола якоря та магнітним потоком. Найменший нахил мають природна (2) та штучна на зниженій напрузі кола якоря (3) (рис. 1.19) характеристики, магнітний потік яких максимальний, а опір кола якоря мінімальний. Штучна реостатна

характеристика (4) має значний нахил, зумовлений увімкненням додаткового

опору в коло якоря, а штучна при ослабленому полі характеристика (1) – зменшенням магнітного потоку.

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження представлені на рисунку 1.20.

Залежність частоти обертання від корисної потужності на валу деякою мірою можна розглядати і як швидкісну характеристику. Але, на відміну від природної характеристики 2 (рис. 1.19), $n = f(P_2)$ є кривою, враховуючи розмагнічувальну дію реакції якоря, якщо ж ця дія суттєва, то крива $n = f(P_2)$ взагалі може зростати (пунктирна лінія на рис. 1.20).

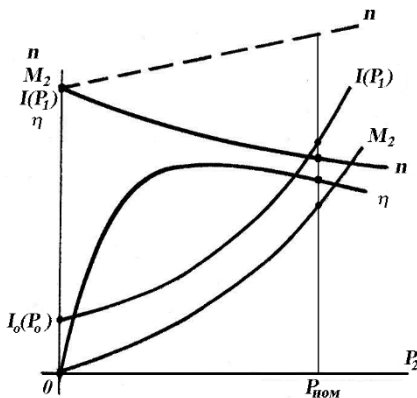


Рисунок 1.20 – Робочі характеристики двигуна паралельного збудження

Варто зазначити, що зростання частоти обертання при зростанні навантаження не бажане, тому що супроводжується нестійкою роботою двигуна, а при значному навантаженні двигун взагалі може піти в рознос, коли частота обертання зростає до безкінечності. Щоб цього не сталося, у деяких двигунів влаштовують стабілізуючу обмотку збудження. Її вмикають послідовно до обмотки якоря так, щоб потоки обох обмоток співпадали. Це дозволяє підтримати магнітну систему в насиченому стані і мати незначну зміну частоти обертання в межах $\Delta n_{ном} = 3-8 \%$.

Якби частота обертання залишалась незмінною ($n = const$), то корисний момент на валу був би пропорційним корисній потужності, тому що

$$M_2 = \frac{P_2}{9,55n} \quad (1.55)$$

Зниження ж частоти обертання призводить до спотворення так званої моментної характеристики двигуна $M_{ем} = f(P_2)$, а отже, і характеристики $M_2 = f(P_2)$, враховуючи (1.47).

Варто зазначити, що двигуни паралельного збудження мають дуже широкий діапазон регулювання частоти обертання – від нуля до $\omega_{макс}$, де значення $\omega_{макс}$ обмежене лише умовами задовільної комутації та механічною міцністю.

Застосовують такі двигуни скрізь, де необхідно плавно в значних межах регулювати частоту обертання і відсутні важкі умови пуску та роботи, наприклад, в допоміжних пристроях металорізальних верстатів, на електростанціях для приводу механізмів, що потребують широкого та плавного регулювання частоти обертання та ін.

Схема двигуна послідовного збудження зображена на рисунку 1.21.

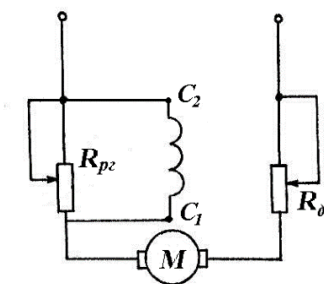


Рисунок 1.21 – Принципова схема двигуна послідовного збудження

Як і у схемі двигуна паралельного збудження, тут використовуються додатковий R_d та регулювальний R_{pz} опори, останній, на відміну від схеми двигуна паралельного збудження, вмикається паралельно до обмотки збудження.

Послідовне з'єднання обмоток збудження та якоря суттєво впливає на характеристики цього двигуна, хоча рівняння швидкісних характеристик мають такий же вигляд, що і для двигунів паралельного збудження.

Оскільки магнітний потік такого двигуна є функцією струму якоря ($I_a = I_z$), то залежність $\Phi = f(I_a)$ називається магнітною характеристикою (рис. 1.22). Якщо для спрощення вважати, нехтуючи насиченням магнітної системи, що залежність між потоком і струмом якоря лінійна (пунктирна лінія на рис. 1.22), то

$$\Phi = k_\Phi I_a, \quad (1.56)$$

де k_Φ – коефіцієнт пропорційності між потоком і струмом.

Враховуючи (1.13), маємо:

$$M_{em} = k k_\Phi I_a^2. \quad (1.57)$$

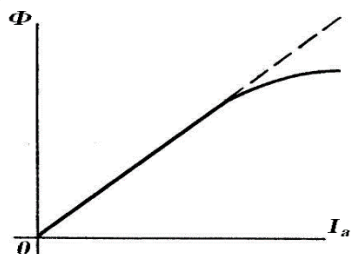


Рисунок 1.22 – Магнітна характеристика двигуна послідовного збудження

Отже, момент, що його розвиває двигун послідовного збудження, пропорційний квадрату струму якоря, тоді як

у двигуна паралельного збудження ця залежність пряма.

Швидкісні (механічні) характеристики. Із (1.51), враховуючи (1.55), маємо:

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{k k_\Phi I_a} \quad (1.58)$$

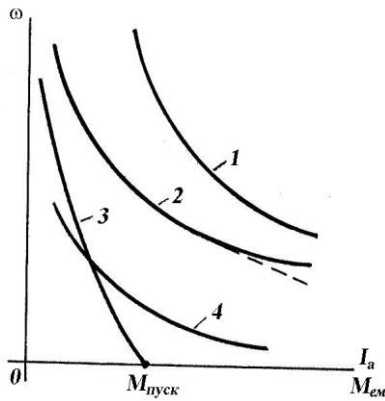


Рисунок 1.23 – Швидкісні (механічні) характеристики двигуна

Оскільки падіння напруги в колі якоря $I_a R_a$ незначне і при $I_a = I_{аном}$ становить 2–4 %, $U_{ном}$, то зменшення чисельника (1.58) при зміні струму якоря досить незначне, тому природна швидкісна (механічна) характеристика $\omega = f(I_a)$ ($\omega = f(M_{ем})$) має гіперболічний характер (крива 2 рис. 1.23).

Особливістю цієї характеристики є її значна крутизна при малих струмах навантаження. Збільшення частоти обертання при малих навантаженнях зумовлене відповідним зниженням

магнітного потоку. Дійсна характеристика $\omega = F(I_a)$ при струмах, що перевищують (0,7–0,8) $I_{аном}$, буде відхилятися від гіперболічної залежності (штрихова лінія кривої 2, рис. 1.23). Це пов'язано з тим, що при значних струмах у зв'язку з насиченням магнітного кола магнітний потік із зростанням струму зростає на менше, ніж впливає з (1.56), через що кутова частота обертання стає дещо більшою. Крім цього, розмагнічувальна дія реакції якоря також знижує магнітний потік, що ще збільшує частоту обертання.

Штучна реостатна характеристика цього двигуна (крива 3, рис. 1.23) ще менш помітна і дозволяє здійснити пуск при відносно незначному пусковому моменті $M_{пуск}$. Досягається така характеристика за допомогою увімкнення додаткового опору в коло двигуна.

Штучна характеристика на зниженій напрузі (крива 4, рис. 1.23) при незначних навантаженнях має більш крутий нахил, а при навантаженнях, близьких до номінальних, майже повторює при нижчій частоті обертання природну характеристику.

При ослабленому полі штучну характеристику двигуна (крива 1, рис. 1.23) можна отримати шляхом шунтування обмотки збудження регульовальним опором (рис. 1.21).

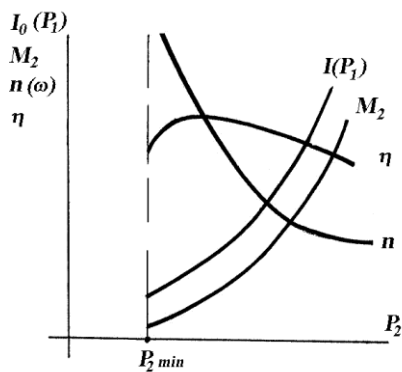


Рисунок 1.24 – Робочі характеристики двигуна послідовного збудження

Робочі характеристики. Ці характеристики зображені на рисунку 1.24.

Побудувати робочі характеристики можна лише з точки $P_{2\min}$. Двигун послідовного збудження не може працювати в режимі холостого ходу через імовірність розносу. $P_{2\min}$, як правило, складає 25–30 % від $P_{ном.}$. Щоб запобігти розносу, вали двигунів послідовного збудження жорстко з'єднують із робочим механізмом муфтою чи зубчатою передачею. Застосування ремінних з'єднань не допускається, оскільки при обриві чи скиданні ремня може відбутися рознос.

Враховуючи особливості двигуна послідовного збудження, а саме, квадратичну залежність електромагнітного моменту від струму

якоря (1.57), такі двигуни використовують тоді, коли існують важкі умови пуску й роботи та необхідно регулювати частоту обертання в широких межах, наприклад, електротранспорт, електропривід прокатних станів та ін. Пояснюється це тим, що при значних змінах навантаження, які супроводжуються штовхальним моментом, струм і потужність, що споживаються з мережі, будуть змінюватися менше, ніж у двигунів паралельного збудження. Наприклад, для двигуна послідовного збудження струм якоря, відповідно до (1.57),

$$I_a = \sqrt{\frac{M_{ем}}{k k_{\phi}}}, \quad (1.59)$$

тоді як у двигунів паралельного збудження при $\Phi = const$, згідно з (1.53),

$$I_a = \frac{M_{ем}}{k_{\phi}} \quad (1.60)$$

Враховуючи незмінність напруги мережі, потужність, що споживається з мережі, має $P_1 = UI$.

Схема двигуна змішаного збудження зображена на рисунку 1.25.

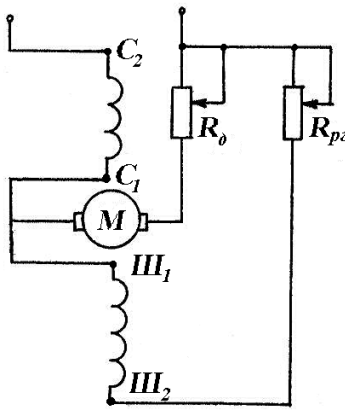


Рисунок 1.25 –

Принципова схема двигуна
змішаного збудження

Зазвичай в таких двигунах послідовна і паралельна обмотки збудження вмикаються так, щоб магнітні потоки, які вони створюють, співпадали. Характеристики двигунів змішаного збудження займають проміжні положення між відповідними характеристиками двигунів паралельного та послідовного збудження.

Якщо послідовна обмотка збудження слабка, то характеристики наближаються до характеристик двигуна паралельного збудження, якщо сильна – до характеристик послідовного. На рисунку 1.26 для порівняння представлені природні механічні характеристики: 1 – двигун послідовного збудження; 2 – двигун змішаного збудження; 3 – двигун паралельного збудження.

Штучні та робочі характеристики такого двигуна займуть також відповідні проміжні положення.

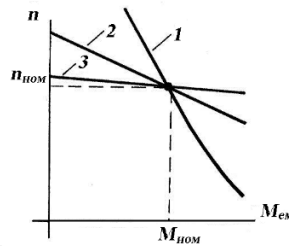


Рисунок 1.26 – Механічні характеристики двигунів постійного струму

Двигуни змішаного збудження використовують залежно від *магніторушійної сили* послідовної обмотки збудження, замість двигунів паралельного або послідовного збудження, а також тоді, коли необхідні значні пускові моменти, швидке прискорення при розгоні, стійка робота, що допускає лише незначне зниження частоти обертання при збільшенні навантаження на валу (прокатні стани, вантажні підіймальники, насоси, компресори).

1.9 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Кутова частота обертання пропорційна напрузі і зворотно пропорційна магнітному потоку збудження. Фізично це можна пояснити тим, що підвищення напруги U або зниження потоку спричинить збільшення різниці $(U - E_a)$, що, своєю чергою, приводить до зростання струму якоря I_a . При зростанні струм підвищує електромагнітний момент $M_{ем}$ (1.13), а оскільки момент навантаження залишається незмінним, то зростає частота обертання.

Вираз (1.51) вказує на можливі шляхи регулювання кутової частоти обертання:

- шляхом зміни напруги U , яку підводять до двигуна; при цьому частота обертання може бути змінена від нуля до $1,15 \omega_{ном}$ (підвищення напруги більше ніж 10–15 % небажане через підвищення напруги між колекторними пластинами і, як наслідок, погіршення комутації);

- введення додаткових опорів у коло якоря, що дає змогу змінювати кутову частоту обертання від номінальної до нуля;

- зміни магнітного потоку, в насиченій машині потік можна лише знизити і, таким чином, збільшити частоту обертання (цього досягають шляхом змінювання струму обмотки збудження) від номінальної частоти обертання до $(1,5–1,7) \omega_{ном}$.

2 ПРИНЦИП ДІЇ ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ

2.1 Пристрій і принцип дії вентильних реактивних двигунів

Електродвигун перетворює електричну енергію на механічну. Електромеханічна система (рис. 2.1) здійснює таке ж перетворення енергії, тому її можна розглядати як електродвигун (вентильний реактивний двигун).

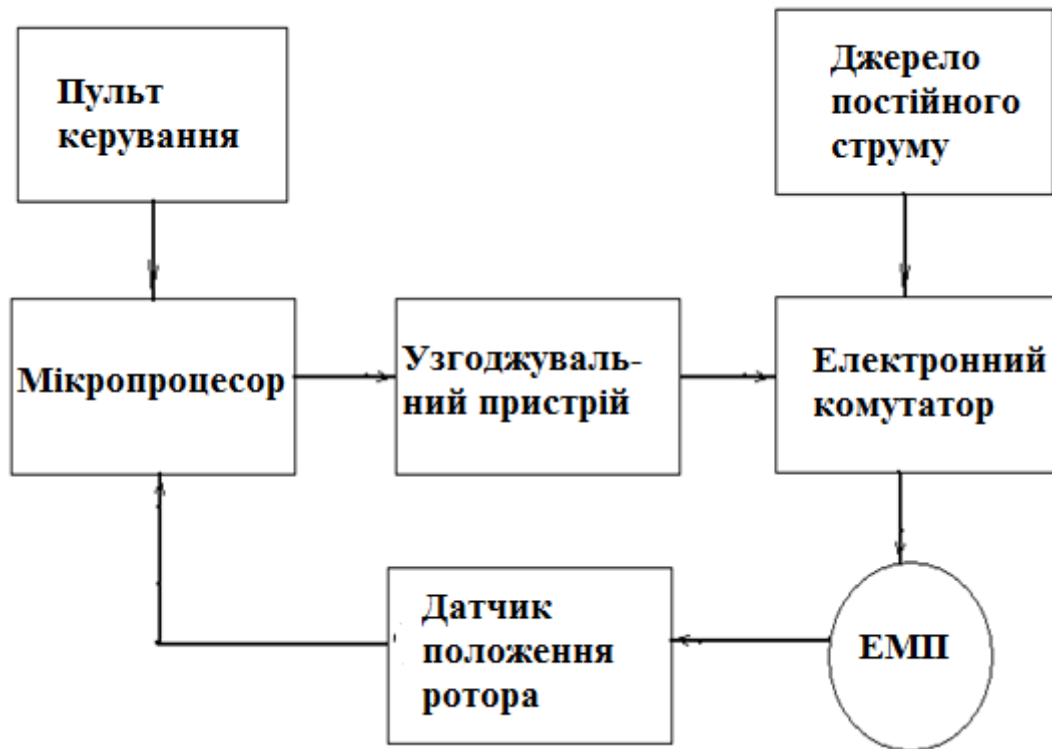


Рисунок 2.1 – Електромеханічна система, що перетворює електричну енергію на механічну

На одному валу з електромеханічним перетворювачем (ЕМП) (рис. 2.1) закріплений датчик положення ротора ДПР. Кожна фаза ЕМП створює крутний момент тільки в певному діапазоні кутів повороту ротора. У цьому діапазоні кутів ДПР виробляє сигнал, який надходить у мікропроцесор і далі, через пристрій, що погоджує, в електронний комутатор, який живиться від джерела постійного струму. При надходженні сигналу в електронний комутатор відповідна фаза ЕМП підмикається до джерела постійного струму. При виході за межі робочого діапазону кутів повороту ротора подача сигналу ДПР припиняється і відповідна фаза закорочується сама на себе, а потім підмикається до напруги зворотної полярності. Таке підімкнення призводить до швидкого спадання струму у фазі до нуля. Задавання величин кутів увімкнення, закорочування і противімкнення здійснюється з пульта управління.

Електромеханічний перетворювач вентильного реактивного двигуна (ВРД) складається з багатозубчастого статора з обмотками на зубцях і багатозубчастого ротора (рис. 2.2). Групи котушок, з'єднаних між собою, утворюють фазу ЕМП. У наведеному прикладі з'єднані між собою котушки на діаметрально протилежних зубцях і, відповідно, початку фаз позначені А, В, С, D, а кінці фаз – а, в, с, d.

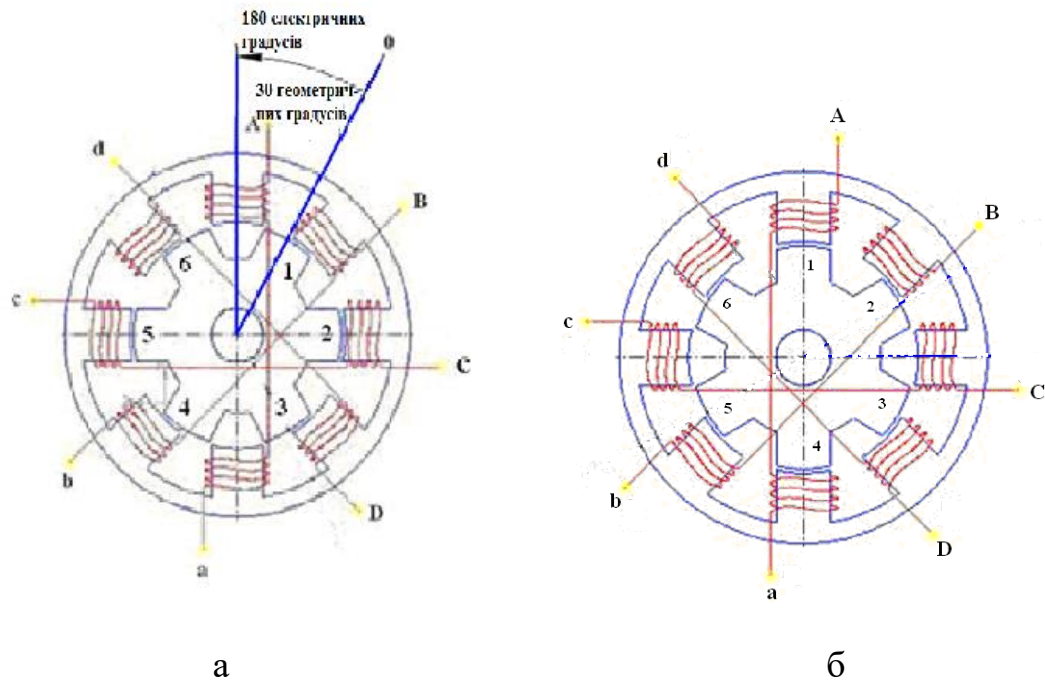


Рисунок 2.2 – Активна частина чотирижильного ВРД з відношенням чисел пазів 8/6:

- а – в неузгодженому положенні щодо зубців фази А;
- б – в узгодженому положенні щодо зубців фази А

Положення зубця ротора, в якому його вісь збігається з віссю зубця статора, називається узгодженим, а положення, в якому вісь зубця статора проходить по осі між двома сусідніми зубцями ротора, неузгодженим. Зокрема, для фази А існує неузгоджене положення (рис. 2.2, а), а для фази С – узгоджене. Вісь, що проходить через середину зубця ротора, який перебуває в неузгодженому положенні, приймається за вісь відліку кута повороту ротора.

$$\zeta = 0 - 180 \text{ ел. град. } \zeta = 180 \text{ ел. град. } \zeta > 180 \text{ ел. град. } \zeta = 180 \text{ ел. град.}$$

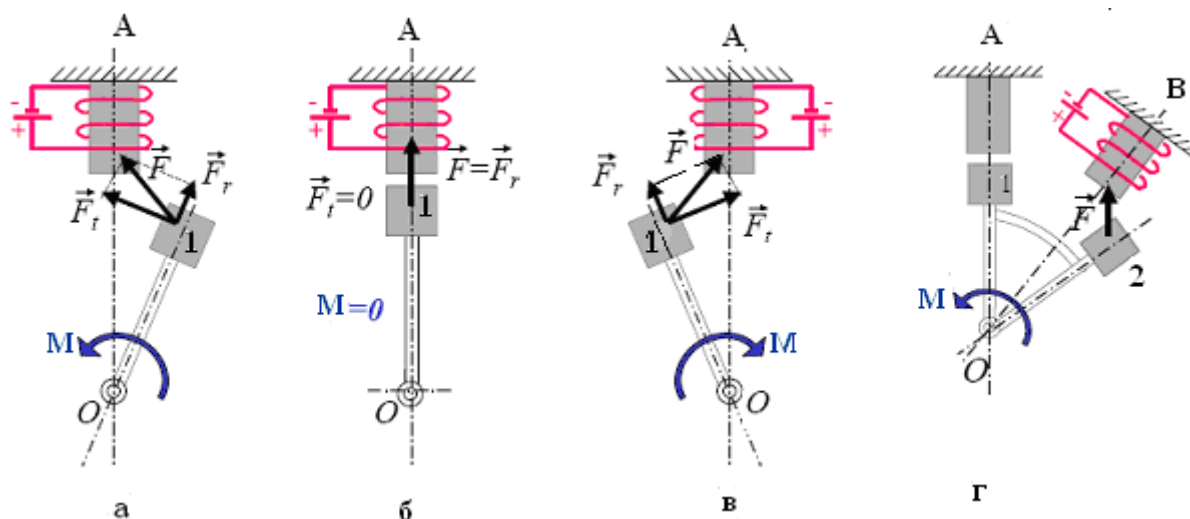


Рисунок 2.3 – Сили і моменти, що діють на зубець 1 (а, б, в) і зубець 2 (г):

а – при значенні кута повороту ротора від $\zeta = 0$ електричних градусів, що відповідає неузгодженому положенню, до $\zeta = 180$ електричним градусам, що відповідає узгодженому положенню;

б – в узгодженому положенні $\zeta = 180$, при протіканні струму в обмотці фази А;

в – при $\zeta > 180$ електричних градусів;

г – при $\zeta = 180$ електричних градусів (узгоджене положення), без струму в обмотці фази А і дії сили F на зубець (2).

Значення кута повороту ротора в цьому положенні дорівнює нулю. При повороті ротора на 30 геометричних градусів проти годинникової стрілки він виявиться в узгодженому положенні, в якому кут його повороту дорівнює 180 електричним градусам:

$$\zeta = \zeta_A \cdot N_p, \quad (2.1)$$

де ζ – кут повороту ротора в електричних градусах;

ζ_A – кут повороту ротора в геометричних градусах;

N_p – число зубців ротора.

При подачі на фазу А постійної напруги струм, що протікає по обмотці, обумовлює виникнення магніторушійної сили і магнітного потоку. За рахунок магнітного тяжіння в неузгодженому положенні (рис. 2.2, а) на зубець 1 діє сила F (рис. 2.3, а). Ця сила може бути розкладена на дві складові: радіальну F_r і тангенціальну F_t . Тангенціальна складова зумовлює появу моменту M . Якщо зубець фази А і зубець ротора не відокремлені (рис. 2.3, а), а зубець фази А розміщується посередині між зубцями ротора 1 і 6 (рис. 2.2, а, неузгодженість положення), то на зубець 6 діє така ж сила F , як і на зубець 1 (рис. 2.3, в), тангенціальна складова якої протилежно спрямована щодо тангенціальної

складової, яка додається до зубця 1. Отже, результуюча тангенціальна складова дорівнює нулю і, відповідно, момент від дії цих сил також дорівнює нулю. Але момент, що діє не на зубець, а на ротор не дорівнює нулю. До ввімкнення фази А підімкненою була фаза D (рис. 2.2, а). Між зубцем ротора 6 і зубцем фази D діє сила магнітного тяжіння, яка обумовлює зміщення ротора проти годинникової стрілки. У міру повороту ротора сила магнітного тяжіння зубця 6 до зубця фази А буде зменшуватися, а зубця 1 до зубця фази А збільшуватися, що зумовить зростання моменту, який діє на ротор. Коли при повороті ротора вісь зубця 1 співпаде з віссю зубця фази А, виникне узгоджене положення (рис. 2.2, б; 2.3, б); тангенціальна складова сили, що діє на зубець 1, буде дорівнює нулю, а радіальна складова буде максимальною, якщо по обмотці фази А буде протікати струм. В узгодженому положенні, при нульовому струмі фази, набуде нульового значення і сила F. Якщо ж струм у фазі А не дорівнює нулю, то при значенні кута повороту ротора більше ніж 180 електричних градусів (рис. 2.3, в) виникає момент, спричинений тангенціальною складовою сили F (-Ft), протилежно спрямований щодо обертання ротора (гальмівний момент). Нульового значення струму в узгодженому положенні можна досягти тільки тоді, коли противвімкнення обмотки відбувається при такій величині кута повороту ротора:

$$\gamma_{off} = \begin{cases} 180 - (\alpha_k - \gamma_{on}) & \text{— якщо перед противвімкненням обмотка} \\ & \text{закорочується;} \\ 90 + \frac{\gamma_{on}}{2} & \text{— якщо закорочування не проводиться,} \end{cases} \quad (2.2),$$

де γ_{on} — кут повороту ротора, при якому обмотка фази підмикається до джерела живлення (кут увімкнення обмотки).

Коли зубець 1 і зубець фази А розмішуватимуться в узгодженому положенні (рис. 2.2, б і 2.3, г) і струм фази А буде дорівнює нулю, відповідно, на зубець 1 не буде впливати сила, і в неузгодженому положенні щодо зубця фази В виявиться зубець 2, на який буде діяти сила F. Тангенціальна складова цієї сили обумовлює наявність моменту обертання ротора. Зокрема, при почерговому ввімкненні і вимкненні фаз при відповідних положеннях зубців ротора здійснюється його обертання.

Характеристики вентильних реактивних двигунів залежать від величин кутів повороту ротора, при яких відбуваються ввімкнення, закорочування і противвімкнення обмотки фази (від кутів комутації).

У ВРД є датчик кута повороту ротора. При конструктивному виконанні датчика (рис. 2.4), на його виході з'являється сигнал прямокутної форми, коли кут повороту ротора дорівнює куту підімкнення обмотки фази до джерела живлення. Тривалість сигналу дорівнює часу, за який із моменту ввімкнення ротор повернеться на кут, що дорівнює різниці кута відімкнення і кута ввімкнення. У цей момент відбувається відімкнення обмотки фази від джерела живлення. Вибір типу і конструктивного виконання датчика кута повороту ротора залежить від режиму змінювання частоти обертання двигуна.

Для незмінною частоти обертання конструкція датчика кутів комутації складається з двох елементів:

1) диск з рівномірно розподіленими по колу, дугоподібними виступами (шторками), насаджений на вал (рис. 2.4, 2.5), встановлений із зовнішньої (рис. 1.4) або з внутрішньої (рис. 2.5) сторони щита;

2) датчик наявності (відсутності) шторки в його робочій зоні (рис. 2.4, 2.6).

Як датчики (2), застосовуються індукційні датчики, датчики Холла і оптичні датчики.

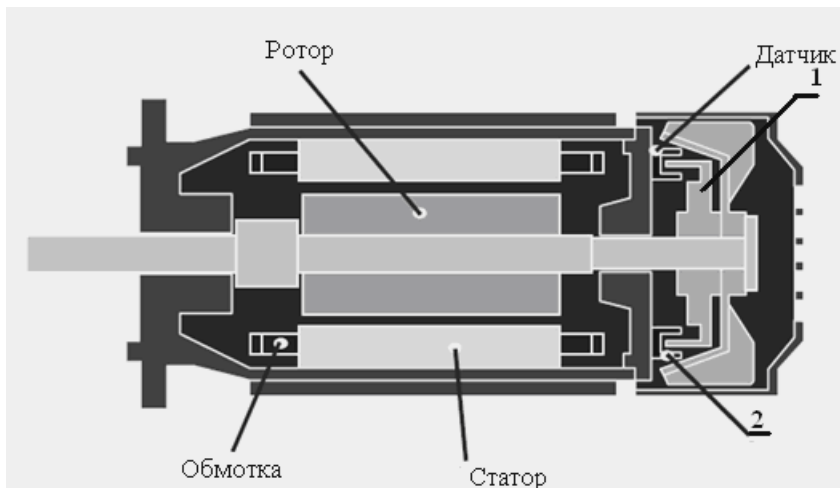


Рисунок 2.4 – Вентильний реактивний двигун із датчиком кутів комутації

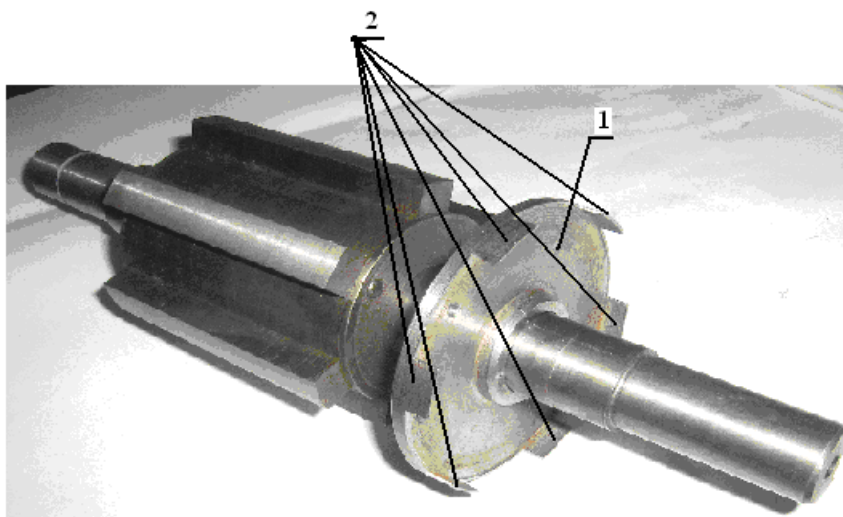


Рисунок 2.5 – Ротор із диском (1) з рівномірно розподіленими по колу дугоподібними виступами (2) (шторками), насаджений на вал

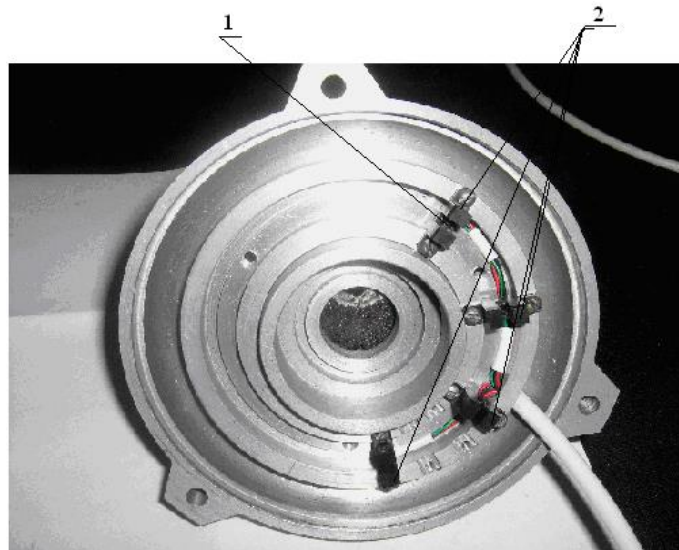


Рисунок 2.6 – Закріплені із внутрішньої сторони підшипникового щита датчики наявності (відсутності) шторки (2) в їх робочих зонах (1)

У той момент, коли край шторки входить у робочу зону датчика, по сигналу, що з'являється на його виході, подається на мікропроцесор (рис. 2. 1), а потім через пристрій на електронний комутатор, здійснюється ввімкнення обмотки. Тривалість сигналу визначається часом перебування шторки в робочій зоні датчика. Чим більший центральний кут, що відповідає дузі шторки, тим більша тривалість сигналу датчика. В разі виходу шторки за межі робочої зони датчика сигнал зникає і комутатор відмикає обмотку від джерела живлення. Із огляду на це величина центрального кута приймається рівною різниці кута відімкнення і кута ввімкнення, чим забезпечується необхідна тривалість перебування обмотки у ввімкненому стані. Кутове положення датчика на щиті двигуна (рис. 2.6) встановлюється так, щоб з'явився сигнал датчика і по цьому сигналу комутатор підімкнув обмотку до джерела живлення.

Комутація, яка базується на появі і зникненні сигналу датчика в міру входу шторки в робочу зону датчика і виходу з неї, можлива при незмінних кутах комутації. Кути комутації будуть незмінними, якщо незмінна частота обертання. При зміні частоти обертання потрібно змінювати кути комутації.

Це можна здійснити так:

- за допомогою мікропроцесора фіксується час між двома найближчими ввімкненнями будь-якої фази, за час, що дорівнює періоду T , ротор повертається на 360 електричних градусів;
- з пульта управління (рис. 2.7) в мікропроцесор вводяться значення кутів комутації;

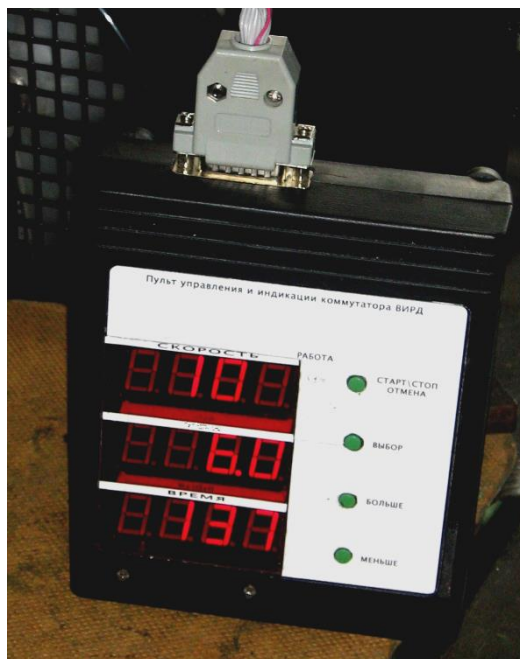


Рисунок 2.7 – Пульт управління ВРД

– мікропроцесор обчислює відповідний час, базуючись на певному періоді T і заданих із пульта кутах комутації:

$$t_B = \frac{\gamma_{on} \cdot T}{2 \cdot \pi}, \quad (2.3)$$

$$t_{від} = \frac{\gamma_{off} \cdot T}{2 \cdot T}, \quad (2.4)$$

$$t_K = \frac{\alpha_K \cdot T}{2 \cdot \pi}, \quad (2.5)$$

де γ_{on} , γ_{off} та α_K – кути ввімкнення, відімкнення і статичний відповідно;

t_B , $t_{від}$ і t_K – моменти часу, коли мікропроцесор видає команду на виконання відповідної дії.

Отже, змінити кути комутації можна на працюючому двигуні.

2.2 Характеристики вентильних реактивних двигунів

Електромагнітні та електромеханічні процеси у вентильному реактивному двигуні описуються рівняннями (2.6) і (2.7):

$$U = ri_1 + \frac{d\Psi_1}{dt};$$

.....

$$U = ri_m + \frac{d\Psi_m}{dt}; \quad (2.6)$$

$$M_{\partial} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.7)$$

де U – напруга джерела живлення,
 i – струм обмотки;
 r – активний опір обмотки статора;
 Ψ – потокозчеплення;
 t – час;
 M_{∂} – електромагнітний момент двигуна;
 M_c – момент опору;
 J – сумарний момент інерції двигуна і механізму;
 ω – кутова частота обертання;
 ζ – кут повороту ротора;
 m – число фаз двигуна.

$$M_{\partial}(i, \zeta) = \sum_{k=1}^m \int_0^i \frac{d\Psi}{d\zeta_k} di, \quad (2.8)$$

де $\zeta_k = \zeta_1 - \frac{2\pi(k-1)}{m} - 2\pi \cdot E\left(\frac{\zeta_1}{2\pi} - \frac{k-1}{m}\right)$.

Вираз (2.8) базується на відомому співвідношенні $M = \frac{\partial W}{\partial \zeta}$, де W – енергія, зміна якої зумовлює виникнення крутного моменту. В цьому випадку такою є коенергія, що дорівнює площі між верхньою кривою (рис. 2.8) і віссю абсцис. При повороті ротора на кут $\partial\zeta$ залежності $\Psi(\zeta)$ відповідатиме нижня крива (рис. 2.8), а зміна коенергії дорівнюватиме площі заштрихованої ділянки, яка і характеризується виразом (2.8).

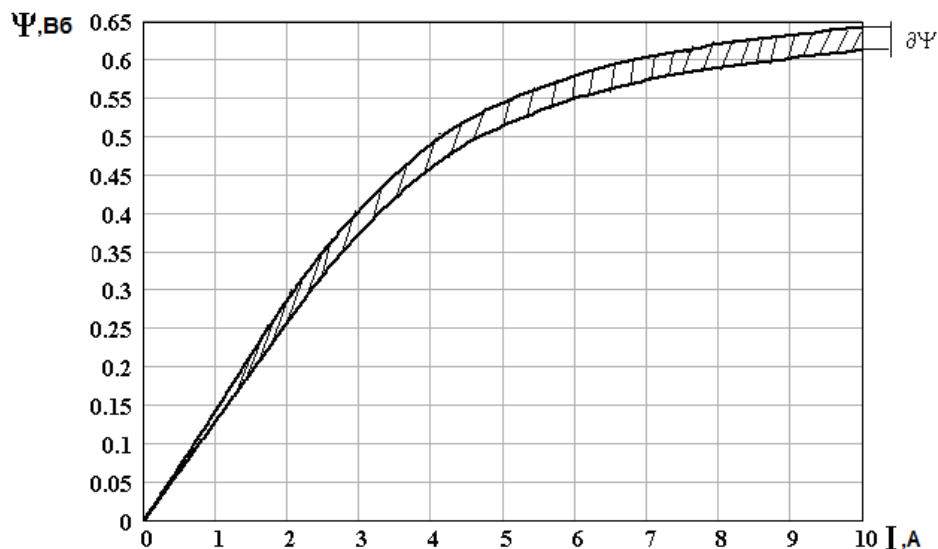


Рисунок 2.8 – Залежність потокозчеплення від струму для двох близьких значень кута повороту ротора

Ліва частина рівнянь, що містить напругу, за цикл комутації приймає три значення:

U – коли обмотка підімкнена до випрямляча, при цьому транзистори VT1 та VT2 відкриті (рис. 2.9, а). В разі цього ввімкнення напруга на ємності

$$U_c = U;$$

0 – коли обмотка замкнута сама на себе, при цьому транзистор VT1 закритий, а VT2 відкритий (рис. 2.9, б);

$-U$ – коли початок і кінець обмотки помінялися місцями щодо затисків випрямляча (режим противімкнення), при цьому обидва транзистори закриті (рис. 2.9, в).

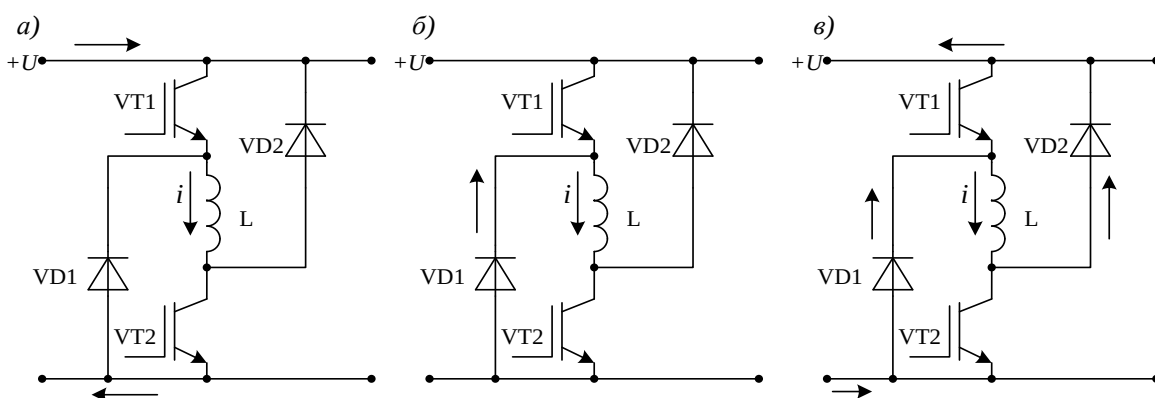


Рисунок 2.9 – Контури струмів при різному стані транзисторів

З розв'язку системи можна отримати механічні характеристики (рис. 2.10).

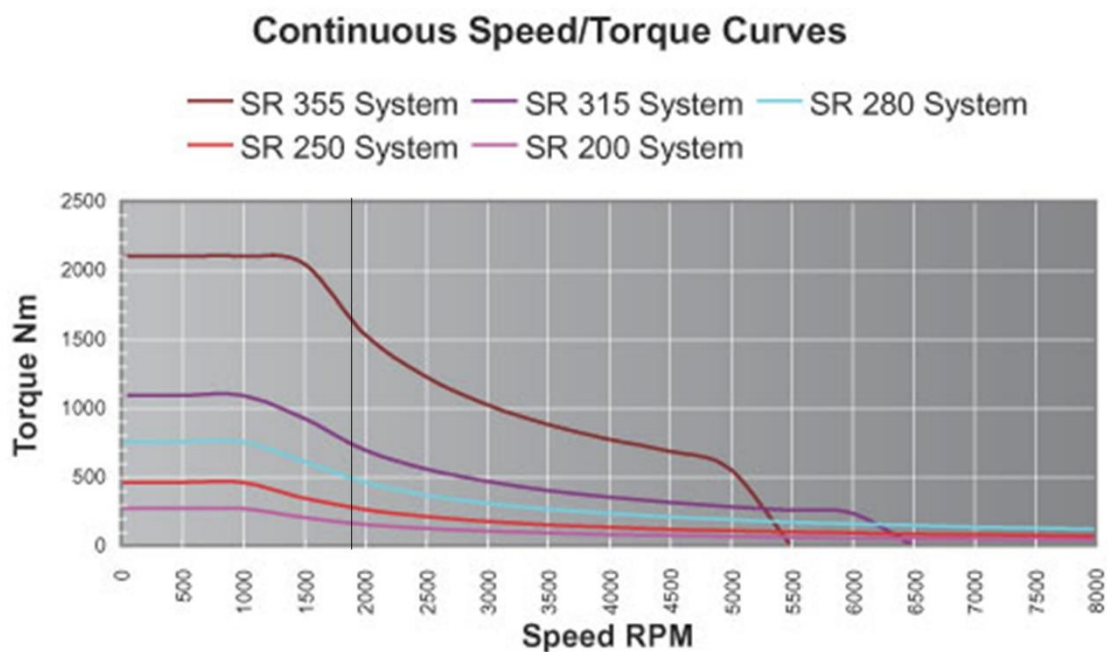


Рисунок 2.10 – Механічні характеристики ВРД SR фірми LeTourneau

Характер кривих струму змінюється залежно від величини навантаження, частоти обертання, ступеня насичення і кутів комутації.

2.3 Вентильний електродвигун постійного струму

Двигуни постійного струму звичайного виконання з механічним комутатором – колектором мають низку дуже істотних недоліків, обумовлених наявністю щітково-колекторного вузла. Ці недоліки обмежують сферу їх застосування.

Останнім часом з'явилися і набули поширення застосування (особливо в схемах автоматики), які передбачають значну надійність роботи у важких умовах експлуатації (вакуум, різко змінювані температури, трясіння, вібрація і т. п.). Це безконтактні двигуни постійного струму не з механічним (щітка – колектор), а з напівпровідниковим комутатором. Ці двигуни, володіючи майже всіма позитивними властивостями звичайних двигунів постійного струму, позбавлені їх основного недоліку – не мають щітково-колекторного вузла.

Статор (якір) двигуна нічим не відрізняється від статора асинхронного двигуна. Ротор становить систему постійних магнітів із кількістю полюсів, що дорівнює кількості полюсів статора. На одному валу з ротором закріплена рухома частина датчика кута повороту ротора (рис. 2.12).

При підімкненні фази А до джерела постійного струму (рис. 2.12) у момент, коли вісь магніту повернута на 90 електричних градусів щодо напрямку магнітного потоку якоря, від взаємодії струму якоря з магнітним потоком полюсів виникає крутий момент.

Під дією крутного моменту швидкість обертання ротора n буде зростати. При цьому буде зростати й величина протидійної напруги е. д. з. E , що створюється в обмотці якоря потоком постійного магніту Φ :

$$E = c_e n \Phi, \quad (2.9)$$

де c_e – постійна величина.

Напруга U в сталому режимі врівноважується е. д. з. E і падінням напруги на активному опорі обмотки якоря від струму I :

$$U = E + Ir = c_e n \Phi + Ir. \quad (2.10)$$

Швидкість обертання n , вираз якої легко отримати з (2.2),

$$n = (U - Ir) / c_e \Phi \quad (2.11)$$

застосовується тоді, коли момент M , що розвивається двигуном, буде дорівнювати моменту опору M_c :

$$M = c_M I \Phi = M_c, \quad (2.12)$$

де c_M – постійна величина.

Комутатор так перемикає секції обмотки якоря, що струми в обмотці якоря під відповідними полюсами магніту завжди мають один і той самий напрям.

Механічний щітково-колекторний комутатор, як уже зазначалося, елемент дуже ненадійний. У оберненої машини, де обмотка якоря нерухома, його легко замінити статичним напівпровідниковим комутатором (перемикачем), керованим деяким датчиком положення ротора, розташованим на валу двигуна.

На рисунку 2.11 представлена структурна схема вентильного двигуна постійного струму.

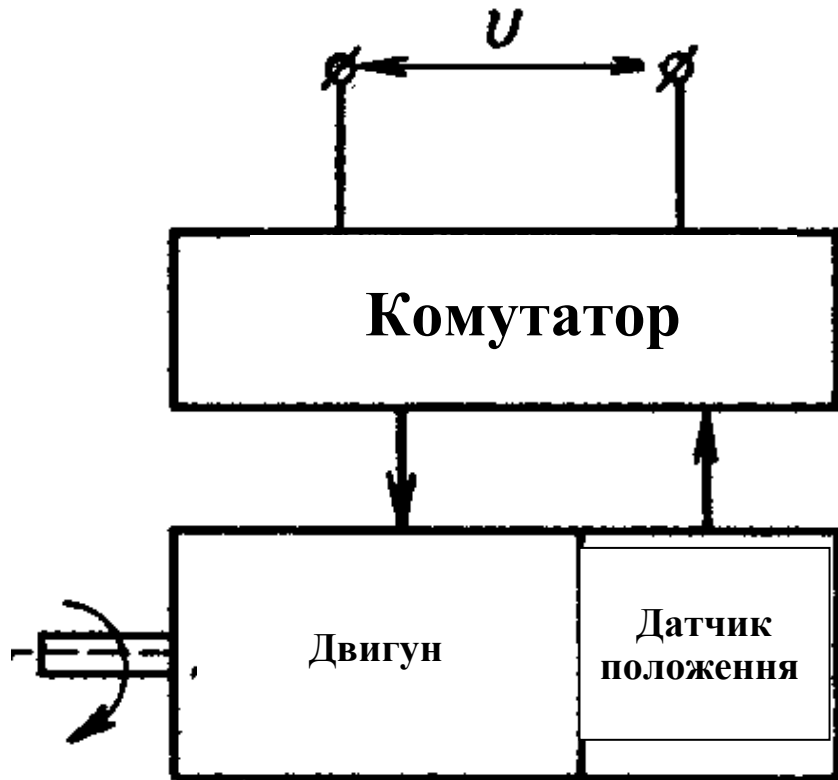


Рисунок 2.11 – Структурна схема вентильного двигуна

Статичний комутатор, отримуючи сигнали управління з датчика положення ротора, може забезпечити при обертанні ротора таке ж змінювання струмів в обмотці якоря, як і щітки з колектором.

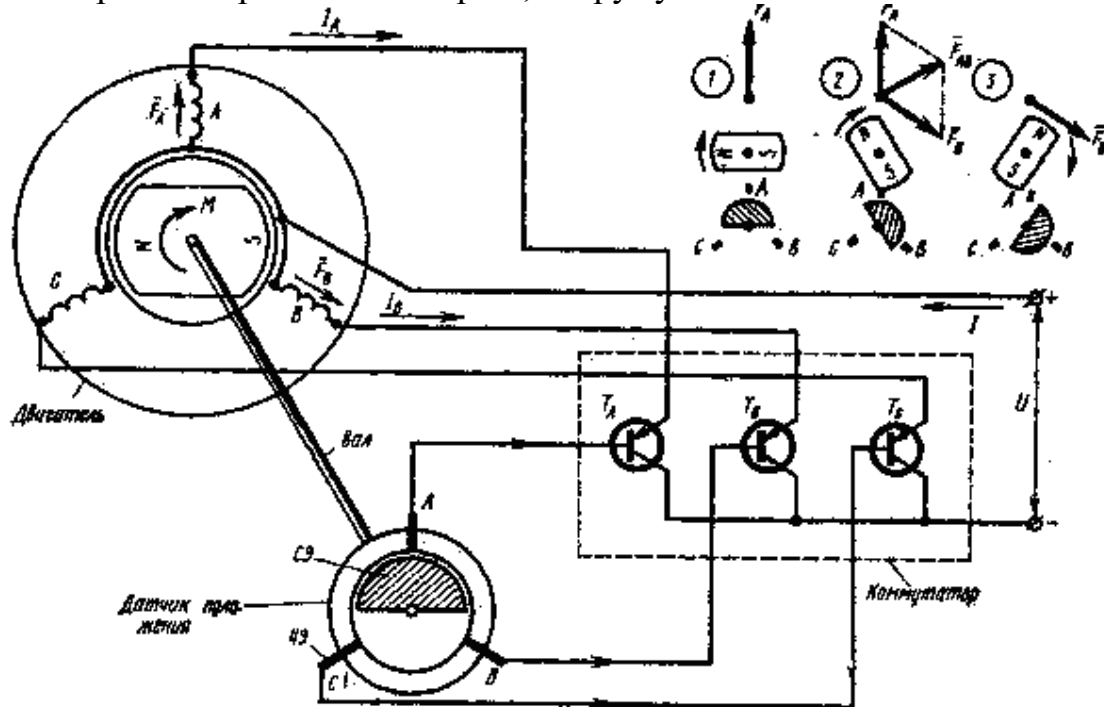
Безконтактні двигуни постійного струму, як правило, складаються з трьох елементів:

- 1) безконтактного двигуна з m -фазної обмоткою на статорі і збудженим ротором у вигляді постійного магніту;
- 2) датчика положення ротора, виконаного в одному корпусі з двигуном, який виробляє сигнали управління, що визначають момент часу й послідовність комутації обмоток двигуна;
- 3) безконтактного комутатора, що змінює за сигналами датчика положення комутації струмів в обмотках статора двигуна.

Принцип дії безконтактного двигуна розглянемо, аналізуючи принципову спрощену схему, представлену на рисунку 2.12.

В одному корпусі з двигуном розміщується датчик положення. Ротор датчика положення має вигляд сегмента, розташованого на одному валу з двигуном. Сегмент є сигнальним елементом СЕ датчика положення. На статорі датчика положення розміщуються чутливі елементи ЧЕ. Їх кількість дорівнює кількості обмоток двигуна, а положення відповідає положенню відповідних обмоток. Як чутливі елементи, можуть використовуватися датчики Холла, магнітодіоди та ін. Під впливом сигнального елемента (сектора) вони виробляють керуючі сигнали, що надходять у комутатор.

Комутатор в розглянутій схемі складається з трьох транзисторів ТА, ТВ, ТС, увімкнених послідовно з обмотками А, В, С двигуна. Керуючі сигнали на транзистори надходять із відповідних чутливих елементів датчика положення. Транзистори працюють у ключовому режимі, тобто мають два стійкі стани – «закритий» або «відкритий». Перший стан існує в разі відсутності сигналу з чутливого елемента датчика положення, другий – за наявності цього сигналу. У положенні, показаному на рисунку 2.12, сигнальний елемент датчика положення розміщується поблизу чутливого елемента, що відповідає обмотці А статора. Це означає, що за рахунок керуючого сигналу (напруги) від цього елемента відкритий транзистор ТА і по обмотці А статора двигуна протікає струм I_A . Транзистори Тв і ТЗ закриті, і струму в обмотках В і С немає.



За рахунок взаємодії МДС FA обмотки A статора з потоком полюсів постійного магніту ротора виникає крутний момент, який, впливаючи на ротор

двигуна, повертає його за часовою стрілкою. Разом з ротором двигуна повертається і ротор датчика положення – його сигнальний елемент. При повороті ротора на кут, трохи більший 30° , сигнальний елемент впливає відразу на два чутливі елементи – елемент А і елемент В. Це означає, що одночасно будуть відкриті і транзистор ТА, і транзистор ТВ, а отже, будуть струми і в обмотці А, і в обмотці поблизу двигуна. Результируюча МДС статора FАВ повернеться порівняно з початковим положенням на 60° (див. положення 2 в правому верхньому кутку рис. 2.12).

Під дією цієї МДС ротор двигуна буде продовжувати своє обертання за годинниковою стрілкою. Коли кут повороту буде трохи більше 90° , сигнальний елемент (сектор) буде впливати лише на чутливий елемент, що відповідає обмотці В. Це означає, що транзистори ТА і МС будуть закриті. Струм буде тільки в обмотці В. МДС двигуна FВ дорівнюватиме МДС обмотки В (див. положення 3 в правому верхньому кутку рис. 2.12). Під дією цієї МДС ротор двигуна буде продовжувати своє обертання в попередньому напрямі. Обертаючись далі, сигнальний елемент буде впливати на чутливі елементи, що відповідають обмоткам В і С і т. д. Таким чином здійснюється робота вентильного двигуна постійного струму.

При обертанні ротора потік постійного магніту спрямовує е. д. з. в обмотці якоря, який разом із падінням напруги на опір обмотки врівноважує прикладене до двигуна напруження, як і в звичайній машині постійного струму. Ротор двигуна розганяється до такої швидкості, при якій крутний момент, що розвивається двигуном, дорівнює моменту опору.

На рисунку 2.12 зображений двигун із трьома обмотками на статорі. Якщо збільшити кількість обмоток, а отже, і кількість чутливих елементів датчика положення, а кількість транзисторів комутатора до кількості секцій (колекторних пластин), яку має звичайний двигун постійного струму, і вважати, що транзистори відкриваються і закриваються миттєво, то за своїми властивостями і характеристиками вентильний і звичайний двигуни постійного струму будуть абсолютно ідентичними.

Фізичні процеси в безконтактному двигуні будуть описуватися тими ж рівняннями (2.1) – (2.5), що і в контактному – колекторному двигуні постійного струму. Однак збільшення кількості обмоток статора безконтактного двигуна пов'язано зі значними труднощами. Справа в тому, що реальні схеми безконтактних двигунів значно складніші, ніж спрощена принципова схема, представлена на рисунку 2.12, на якій зображені лише основні функціональні елементи.

В реальній схемі для забезпечення нормальної роботи датчика положення, посилення сигналів управління його чутливих елементів, забезпечення чіткої роботи транзисторів комутатора і т. п. використовується багато найрізноманітніших допоміжних елементів, які значно ускладнюють схему двигуна, збільшують її габарити і вартість. Саме тому при проєктуванні безконтактних двигунів завжди намагаються забезпечити мінімальну можливу кількість обмоток статора, що призводить до зменшення кількості чутливих елементів датчика положення і транзисторів комутатора. У сучасних

вентильних двигунах кількість обмоток статора зазвичай не перевищує чотирьох.

Невелика кількість обмоток (секцій) обумовлює низку особливостей вентильного двигуна порівняно з колекторним двигуном.

На рисунку 2.13, а представлені механічні характеристики вентильного двигуна при різних індуктивностях обмоток L і різній напрузі – коефіцієнтах сигналу α . Вони аналогічні характеристикам звичайного виконавчого двигуна постійного струму при якірному управлінні, тільки при $L \neq 0$ вони нелінійні. Нелінійність характеристик збільшується зі збільшенням L . Вплив L особливо значний при виході з рухового режиму.

Швидкість обертання безконтактних двигунів можна регулювати в широких межах шляхом змінювання напруги і коефіцієнта сигналу α . На практиці, однак, цей спосіб не набув широкого застосування. Справа в тому, що в схему вентильного двигуна органічно входить комутатор, який, по суті, є підсилювачем потужності. Впливаючи на транзистори, що входять у комутатор, можна регулювати і стабілізувати швидкість обертання ротора вентильного двигуна за допомогою дуже незначних потужностей управління.

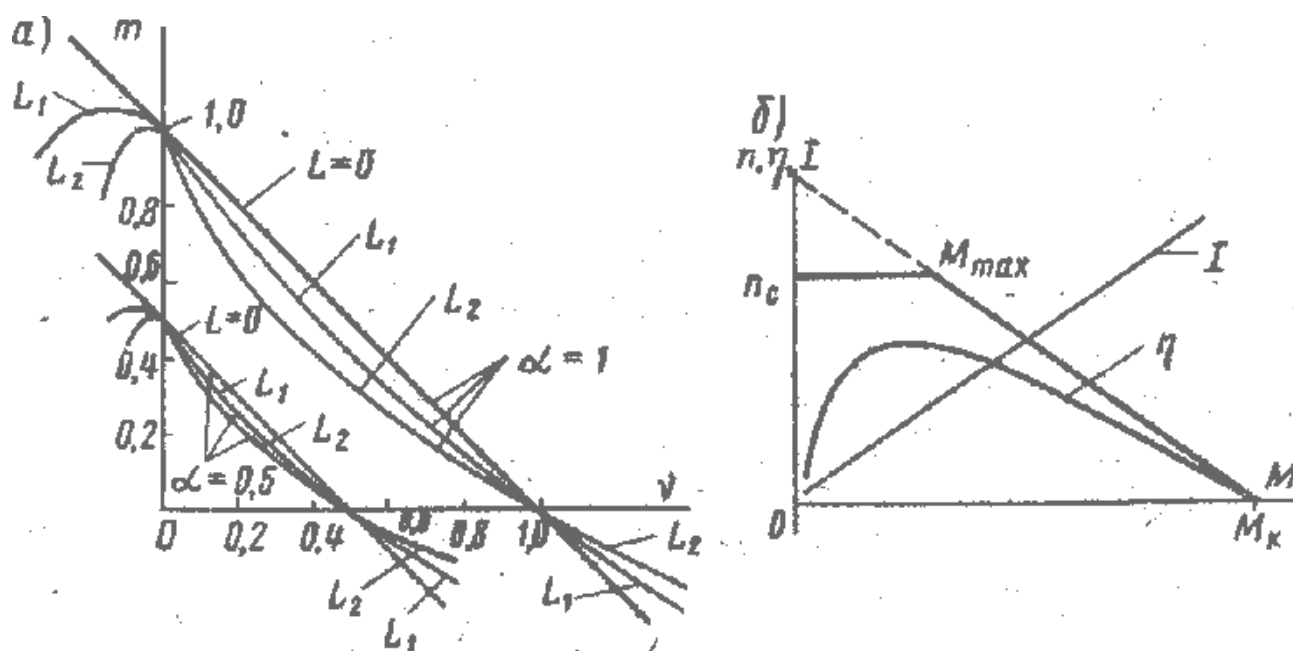


Рисунок 2.13 – Механічні (а) і робочі (б) характеристики вентильного двигуна постійного струму ($L_2 > L_1$)

На практиці зазвичай застосовуються частотно-імпульсні методи регулювання і стабілізації. На рисунку 2.13, б представлені робочі характеристики вентильного двигуна зі стабілізацією швидкості при малих моментах опору.

Комутація струмів у вентильному двигуні, як і в контактному, значною мірою визначається індуктивністю L його обмоток.

Внаслідок незначного часу перемикання при розмиканні обмотки якоря виникають великі перевантаження $[EL = di / dt]$ на переході емітер – колектор, що може при значній індуктивності L призвести до електричного пробою переходу.

Дуже серйозною проблемою при розмиканні обмотки з великою індуктивністю L є проблема розсіювання енергії магнітного поля $(Li^2 / 2)$, накопиченої обмоткою при протіканні по ній струму. Якщо не вживати спеціальних заходів, ця енергія, виділяючись на переході емітер – колектор, може призвести до перегріву транзистора і до виходу його з ладу. Для захисту транзисторів від перевантажень і перегріву застосовуються спеціальні схеми.

У деяких конструкціях вентильних двигунів енергія, накопичена внаслідок відімкнення обмотки за рахунок взаємоіндукції, передається іншій – увімкненій обмотці. У цьому випадку вона витрачається на створення крутного моменту.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2011. – 464 с.
2. Півняк Г. Г. Електричні машини : навч. посіб. / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 331 с.
3. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.

Електронне навчальне видання

ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

(МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ВЕНТИЛЬНІ ДВИГУНИ)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальностей G3 – Електрична інженерія, G4.03 –
Енерговиробництво (Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика))*

Відповідальний за випуск *О. Б. Єгоров*

Редактор *О. А. Норик*

Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова, І. В. Волосожарова*

План 2025, поз. 166Л

Підп. до друку 26.12.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 3,2.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 8386 від 14.07.2025.