Лекція №2

БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

План лекції:

1. Призначення та види машин постійного струму.
2. Будова машин постійного струму загального призначення.
3. Принцип дії узагальненої машини постійного струму.
4. Принцип оберненості машин постійного струму.

1 Призначення та види машин постійного струму

Машиною постійного струму (МПС) називається така обертова електрична машина, в якій під час основного процесу перетворення енергії споживається або виробляється електрична енергія постійного струму.

За призначенням розрізняють наступні види МПС:

1. **Генератори постійного** струму (ГПС), призначені для генерування електричної енергії постійного струму.

2. **Двигуни постійного** струму (ДПС), призначені для приведення в рух робочих машин і механізмів з регулюванням частоти обертання в широких межах.

3. **Електромашинні підсилювачі** (ЕМП) постійного струму, призначені для підсилення потужності постійного струму, до яких відносяться ЕМП з поперечним та повздовжнім полем.

4. **Електромашинні перетворювачі** постійного струму в змінний струм і навпаки, до яких відносяться двохякірні перетворювачі, одноякірний перетворювач постійного струму та одноякірний перетворювач змінного струму в постійний.

5. **Електричні машини постійного струму систем автоматики**, до яких відносяться виконавчі двигуни із звичайним якорем, з порожнім и дисковим якорем с печатними обмотками; тахогенератори, призначені для контролю і вимірювання частоти обертання механізмів і машин.

6. **Спеціальні види МПС**: уніполярні машині, магнітогідродинамічні машини (МГД), вентильні двигуни постійного струму та ін.

Найчастіше машини постійного струму використовуються в якості **двигунів та генераторів**.

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

Машини постійного струму **серії П** (серія створена в 1956 році, для неї встановлена нормалізована шкала потужностей та номінальних частот обертання) застосовуються як двигуни і генератори у різних галузях промисловості і сільського господарства. Випуск машин серії П припинений, але в експлуатації знаходиться значна кількість машин. Електричні машини серії П охоплюють діапазон потужностей : від 0,3 до 200 кВт – 1- 11 габарити; від 200 до 1400 кВт – 12-17 габарити; понад 1400 кВт – 18-28 габарити. Габарит машини визначається зовнішнім діаметром якоря.

Електричні машини серії 2П (серія створена в 1974 році, спроектована у відповідності із вимогами МЕК, має єдину шкалу номінальних висот осі обертання) замінили машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС(Т), ПБС(Т), ПР. Серія машин постійного струму 2П охоплює висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт.

Машини цієї серії призначені для роботи в електроприводах з широким діапазоном регулювання швидкості. У порівнянні з попередніми серіями в машинах **серії 2П** підвищена перевантажувальна здатність, розширені діапазон регулювання частоти обертання, покращені динамічні властивості, зменшені шум і вібрації, підвищена потужність на одиницю маси, збільшені надійність і ресурс роботи.

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

- **за регулювальними властивостями**: двигуни з нормальним регулюванням з діапазоном до 1:5 і двигуни з широким регулюванням - до 1:1000;

- **по типу конструкції**: закриті, захищені;

- **за умовами експлуатації**: нормальні, з тяжкими умовами експлуатації.

Двигуни потужністю до 10 кВт з нормальними регулювальними властивостями становлять майже 2/3 загальної потреби галузей народного господарства в машинах постійного струму. З метою значного зниження (в 2 - 3 рази) трудомісткості виготовлення таких дви-

гунів в новій серії реалізована ідея уніфікації конструкції машин постійного струму з асинхронними двигунами серії 4А. Це визначило можливість застосування для виробництва статора, обробки корпусних деталей, складання і випробувань машин постійного струму технологічного устаткування, створеного для серії 4А.

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

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

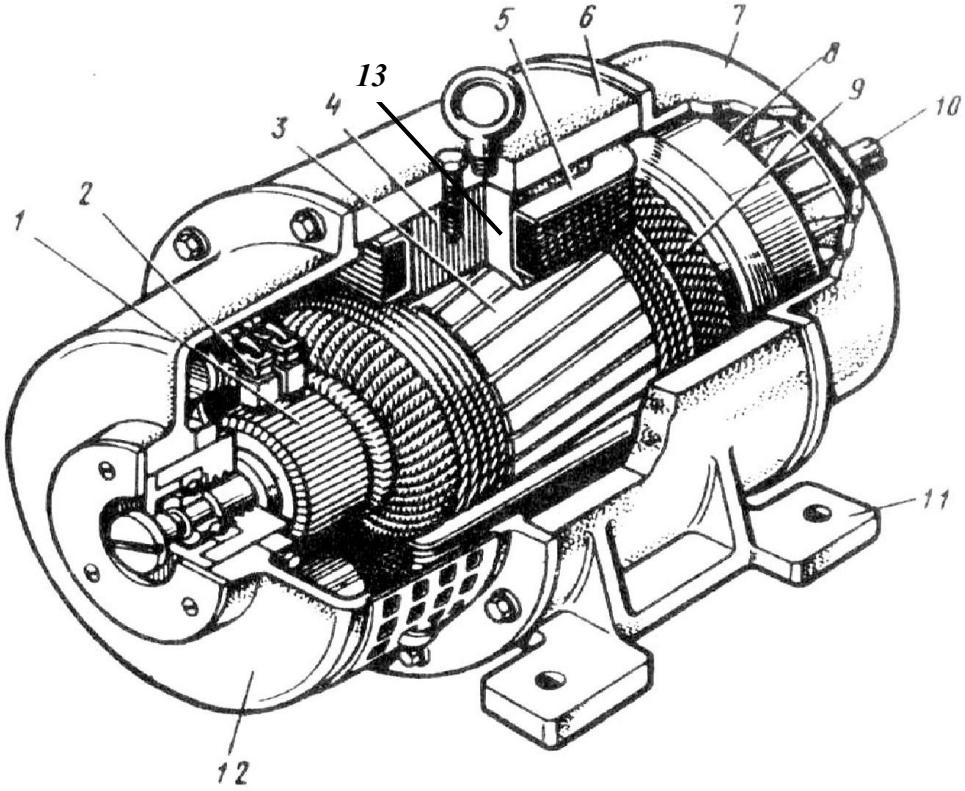
Перевагами уніфікованої конструкції двигунів постійного струму в порівнянні з явнополюсними традиційної конструкції є:

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

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

2 Будова машин постійного струму загального призначення

Машина постійного струму складається зі **статора**, **ротора (якоря) і повітряного проміжку** (рисунок 2.1).



1 – колектор; 2 – щітко утримувач зі щітками; 3 – осердя якоря із обмоткою; 4 – головні полюси; 5 – полюсна котушка (обмотка); 6 – станина; 7 , 12 – підшипникові щити; 8 – вентилятор; 9 – лобові частини обмотки якоря; 10 – вал; 11 – лапи станини; 13 – осердя головного полюсу (ярмо).

Рисунок 2.1 – Будова машини постійного струму

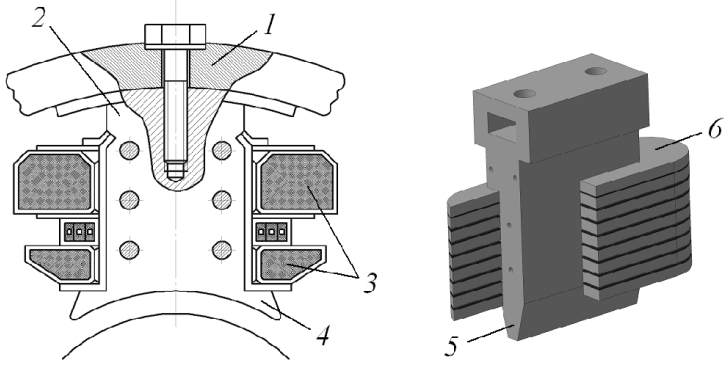
Нерухома частина машини – статор – складається зі **станини 6 (корпуса), ярма 13, головних і додаткових полюсів з обмотками 5**.

Ярмо 13 (рисунок 2.1) в машинах постійного струму призначено для створення шляху, за яким замикається постійний магнітний потік машини. Зазвичай, ярмо виконується масивним зі сталевих труб (для машин малої потужності), стального прокату або стального лиття і одночасно виконує функції станини - частини, до якої кріпляться інші нерухомі частини і за допомогою якої машина закріплюється на фундаменті або основі.

Головні полюси (рисунок 2.2) призначені для створення основного магнітного потоку машини і складаються з осердя і обмотки, додаткові полюси призначені для зменшення іскріння під щітками. Осердя полюсів набираються з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5-1 мм або з листів конструкційної сталі товщиною до 2 мм.

Оскільки магнітний потік в сталих режимах роботи машини практично не змінюється, то виштамповані листи не ізолюються один

від іншого. Осердя полюсів стягуються шпильками, або масивними сталевими стрижнями. Нижня, розширена частина осердя головних полюсів називається **полюсним наконечником** або полюсним башмаком.



а *б*

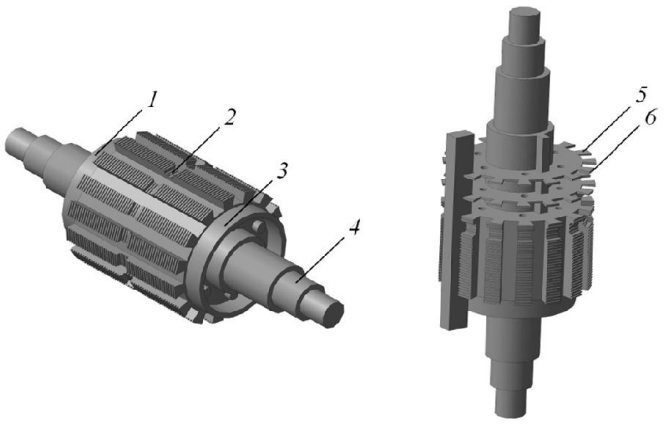
а – головний полюс; б – додатковий полюс;

1 – станина; 2 – осердя основного (головного) полюса; 3 – обмотка збудження; 4 – полюсний наконечник; 5 – осердя додаткового полюса; 6 – обмотка додаткового полюса

Рисунок 2.2 – Будова полюсів МПС

Обмотки головних 3 і додаткових 6 полюсів виготовляють з ізольованого мідного проводу круглого або прямокутного перерізу (рисунок 2.2). Розташована на полюсі обмотка часто розділяється на декілька котушок, які розділяються дистанційними шайбами, для покращення охолодження.

Ротор машини постійного струму складається з якоря і колектора, які розташовані на валу. Осердя якоря набирається з штампованих дисків електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм (рисунок 2.3).

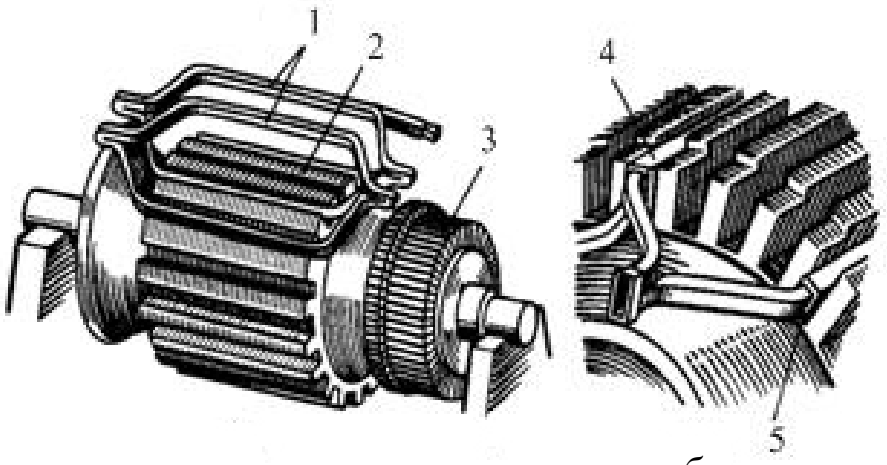


а *б*

1, 3 – натискні шайби (для утримання обмотки); 2 – виточка для укладання бандажа; 4 – місце для пресування колектора; 5 – ізоляційна плівка; 6 – сталевий лист

Рисунок 2.3 – Будова осердя якоря (а) і його збирання (б)

Диски насаджуються безпосередньо на вал (в машинах малої та середньої потужності) або набираються на якірну втулку (в машинах великої потужності). Осердя якоря діаметром більше 100 см та більше виготовляються зі штампованих сегментів. В осерді якоря в залежності від вибраної системи вентиляції можуть бути **аксіальні** або **радіальні** канали. Аксіальні канали утворюються отворами в дисках осердя. Радіальні канали утворюються дистанційними розпірками, які розділяють осердя на окремі пакети. В пази на поверхні якоря укладається обмотка якоря (рисунок 2.4).



а *б*

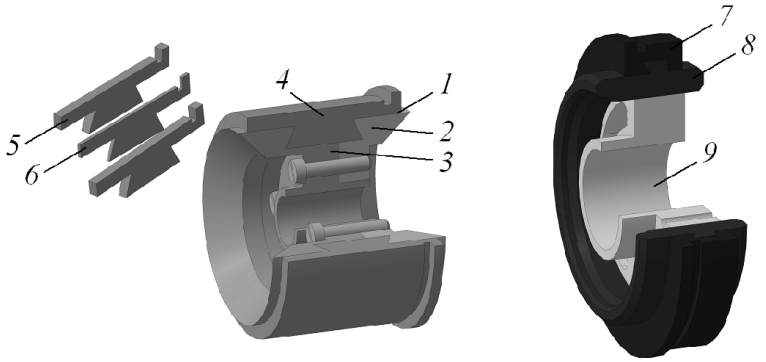
1 – якірні котушки; 2 – осердя якоря; 3 – колектор; 4 – верхня сторона якірної котушки; 5 – нижня сторона якірної котушки

Рисунок 2.4 – Будова якірних котушок (а) і розташування їх в пазах (б)

Обмотку якоря виготовляють з круглого або прямокутного обмотувального проводу. Зазвичай, обмотка складається з окремих, заздалегідь намотаних якірних котушок, які ізолюють і укладають в пази осердя якоря. Обмотку виконують двохшаровою, в кожний паз укладають дві сторони різних якірних котушок - одну над іншою. Кожна якірна котушка включає в себе декілька секцій, кінці яких припаюють до відповідних колекторних пластин. Секції обмотки можуть бути одно- або багатовитковими.

Колектор машини постійного струму (рисунок 2.5) складається з мідних пластин товщиною 3-15 мм, ізольованих одна від іншої міканітовими прокладками товщиною близько 1 мм. Пластини мають трапецеїдальний переріз і разом з прокладками складають кільце, яке скріпляється за допомогою фланців.

Секції обмотки якоря впаюють в прорізи, які розташовані в виступаючої частини пластин. В машинах малої і середньої потужності використовують колектори, в яких мідні пластини і міканітові прокладки запресовані в пластмасу. Поверхню зібраного колектора обточують на токарному верстаті і шліфують. Для того, щоб міканітові прокладки при спрацюванні колектора на виступали над пластинами і не викликали вібрації щіток, їх фрезерують на 0,8-1,5 мм нижче поверхні колектора.



а *б*

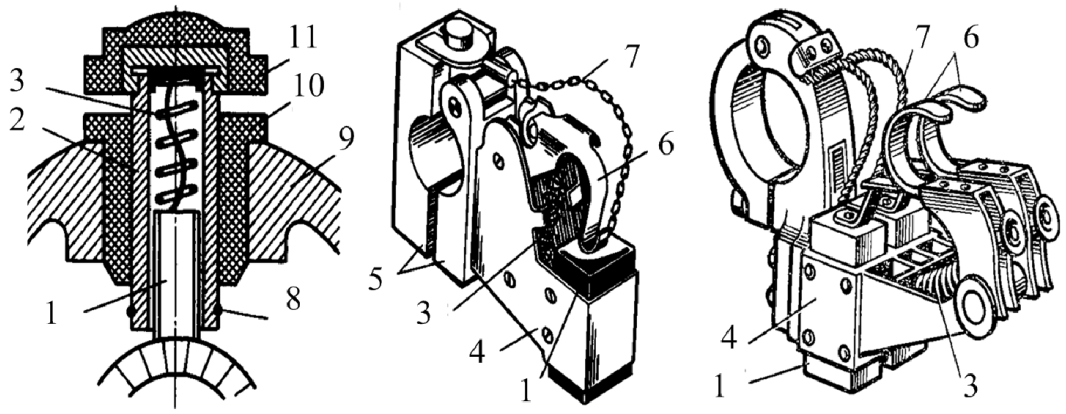
1 – ізоляційні манжети; 2 – натискний фланець; 3 – корпус; 4 – колекторна пластина; 5 – виступаюча частина колекторної пластини; 6 – ізоляційна прокладка; 7 – колекторна пластина з ізоляційними прокладками; 8 – пластмаса; 9 – втулка.

Рисунок 2.5 – Будова колектора машини постійного струму з металевим (а) і пластмасовим (б) корпусом

Для відведення та підведення струму до колектора використовується **щітковий апарат** (рисунок 2.6), до складу якого входять: щітки, щіткоутримувач, щіточні пальці, траверса і струмові шини.

Щіткоутримувачі закріплюються на щіточних пальцях, які кріпляться до щіточної траверси і електрично ізолюються від неї. Траверса закріплюється на нерухомій частині машини. Зазвичай передбачається можливість повороту траверси для встановлення щіток в правильне положення.

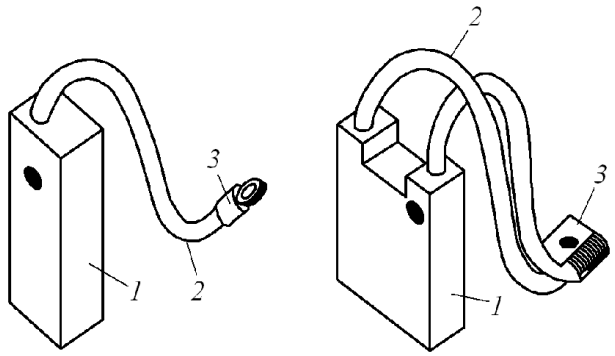
В залежності від складу, способу виготовлення та фізичних властивостей всі щітки (рисунок 2.7) ділять на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-графітні, бронзо-графітні та срібно-графітні. Вибір і застосування щіток залежить від типу машини, умов і режимів роботи.



а *б* *в*

1 – щітка; 2 – обойма; 3 – пружина; 4 – обойма; 5 – затискачі для кріплення до щіткового пальця; 6 – натискні пластини; 7 – щітковий канатик; 8 – затискач для вивідного провідника; 9 - підшипниковий щит; 10 – ізоляційна втулка; 11 – ковпак

Рисунок 2.6 – Будова щіткоутримувачів МПС малої (а), середньої (б) і великої (в) потужності



а *б*

1 – щітка; 2 – щітковий канатик; 3 – кабельний наконечник.

Рисунок 2.7 – Будова щіток МПС малої (а) і великої (б) потужності

Колектор і щітковий апарат найбільш відповідальні вузли, від конструкції і якості яких залежить надійна робота машини постійного струму.

3 Принцип дії узагальненої машини постійного струму

Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рисунок 2.8). Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1 (N, S), що створюють основний магнітний потік *Ф*, і ярма (станини), не наведеного на рисунку 2.8. Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталевого осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізольованих одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами.

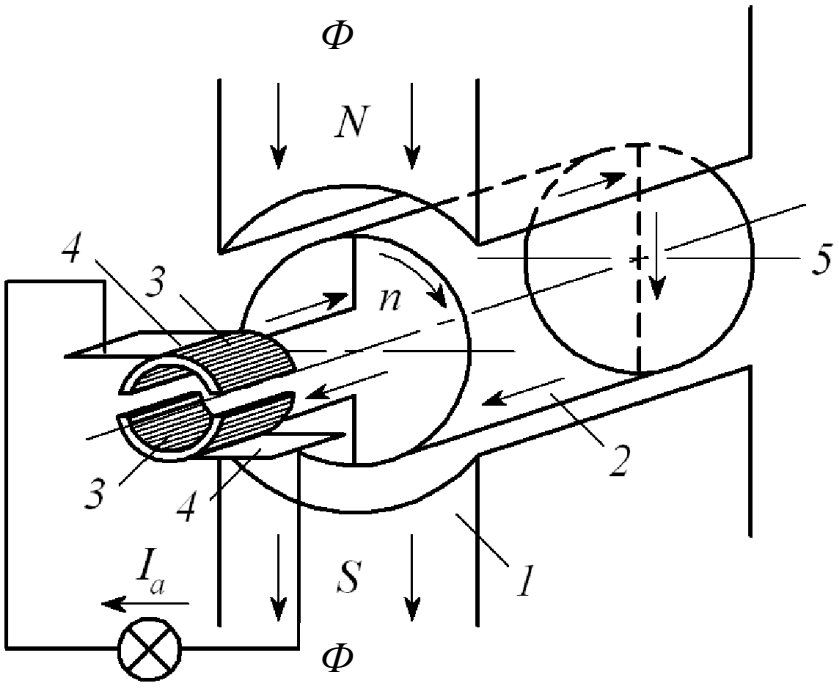


Рисунок 2.8 – Модель машини постійного струму

Магнітний потік *Ф* виходить з північного полюса *N,* пронизує якір, входить у південний полюс *S* і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса *N*.

Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами, до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.

Режим генератора. Якір машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. В провідниках обмотки якоря індукується електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полю-

сів Φ вважається постійним, то індукована ЕРС створюється виключно внаслідок обертання якоря і називається ***ЕРС обертання***.

Величина ЕРС обертання, що індукується в провіднику обмотки якоря

$$e_{пр} = B \cdot l \cdot v, \tag{2.1}$$

де B - величина магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом і якорем в місці розташування провідника;

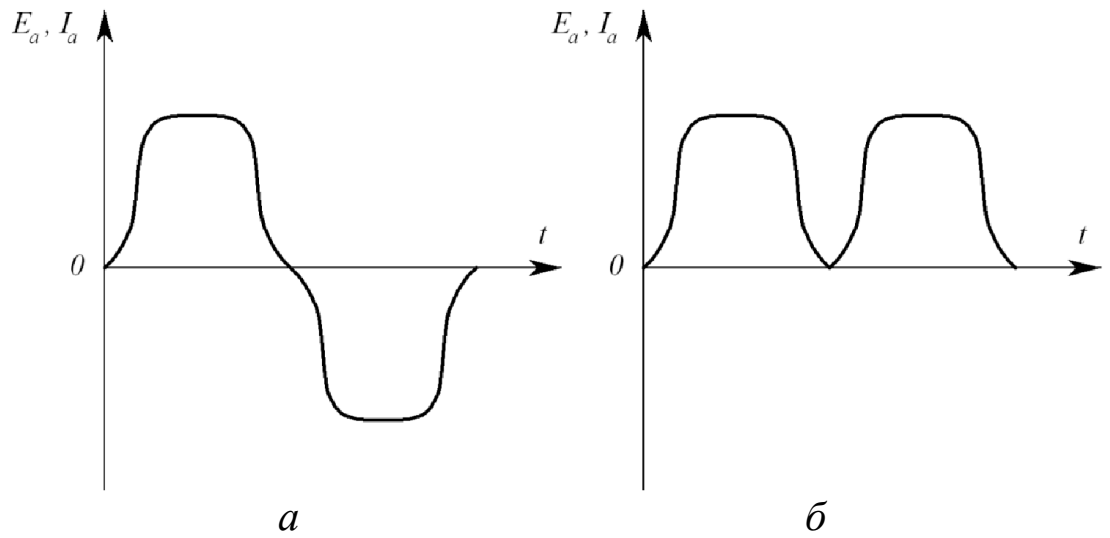
l - активна довжина провідника, тобто довжина, на протязі якої провідник розташований у магнітному полі;

v - лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індукуються однакові $e_{пр}$, які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини, амплітудне значення якої визначається виразом

$$E_a = 2e_{пр} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v. \tag{2.2}$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять почергово під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику змінюється. За формою крива ЕРС провідника повторює криву розподілення індукції B в повітряному проміжку (рисунок 2.9, а). Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.



а *б*

Рисунок 2.9 – Форма кривої ЕРС і струму в якорі (а) і зовнішній мережі (б) моделі машини постійного струму

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a. В обмотці якоря струм буде змінним і його крива буде аналогічною кривій ЕРС (рисунок 2.9, а).

Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором (рисунок 2.8) і зміні напряму ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок чого, під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. В результаті чого, полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними.

Таким чином, в генераторі колектор виконує функцію механічного випрямляча, який перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішній мережі.

Змінивши знак напівперіода кривої ЕРС і струму I_a (рисунок 2.9, а), отримаємо форму кривої ЕРС і струму I_a в зовнішній мережі (рисунок 2.9, б).

Напруга постійного струму на затискачах генератора визначається E_a і величиною падіння напруги на опорах елементів обмотки якоря ΣR_i

$$U_a = E_a - I_a \cdot \Sigma R_i . \qquad (2.3)$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили (рисунок 2.10, а)

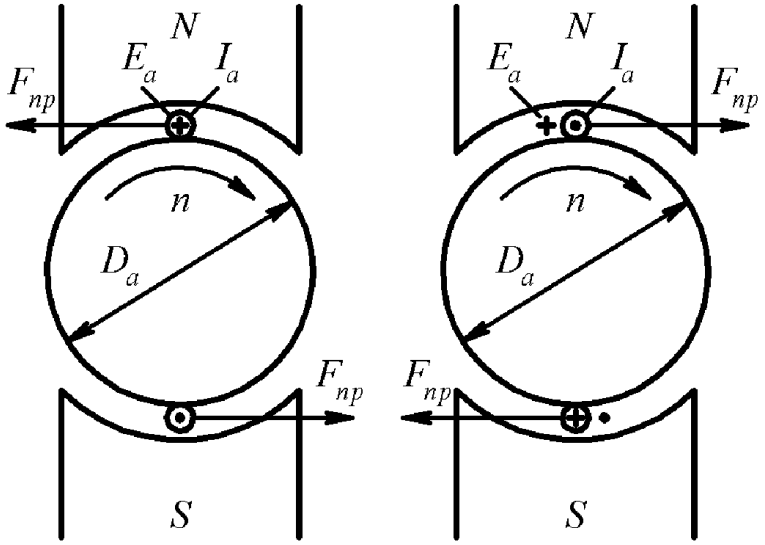
$$F_{пр} = B \cdot l \cdot I_a , \qquad (2.4)$$

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

$$M_{ем} = F_{пр} \cdot D_a , \qquad (2.5)$$

де D_a – діаметр якоря, мм.

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



а *б*

Рисунок 2.10 – Робота моделі машини постійного струму в режимі генератора (*а*) і двигуна (*б*)

Режим двигуна. До обмотки якоря підводиться постійна напруга U_a від зовнішнього джерела живлення, по обмотці якоря протікає струм I_a. При цьому на провідники обмотки якоря діють електромагнітні сили $F_{пр}$ і створюється електромагнітний момент $M_{ем}$ (рисунок 2.10, б). Значення величин $F_{пр}$ і $M_{ем}$ визначаються рівняннями (2.4) і (2.5). При достатньому значенні $M_{ем}$, якір машини буде обертатися і розвивати механічну потужність. Момент $M_{ем}$ при цьому є обертовим і діє в напрямку обертання якоря.

В режимі двигуна колектор перетворює постійний струм, що споживається з зовнішньої мережі, в змінний струм, що протікає в обмотці якоря, і виконує функції механічного інвертора струму.

Провідники обмотки якоря в режимі двигуна обертаються в магнітному полі, в них індукується E_a, величина якої визначається виразом (2.2). При збереженні напряму обертання якоря, напрями напруги U_a і струму I_a в обмотці якоря при зміні режиму змінилися на протилежний (рисунок 2.10, б).

Таким чином, E_a в двигуні постійного струму направлена зустрічно прикладеній напрузі U_a і струму I_a в обмотці якоря, тому E_a в якорі двигуна постійного струму називається ***противоЕРС***.

Напруга, прикладена до затискачів якоря двигуна постійного струму, врівноважується E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки елементів якоря ΣR_i

$$U_a = E_a + I_a \cdot \Sigma R_i . \qquad (2.6)$$

Аналізуючи рівняння (2.3) і (2.6), можна зробити висновок, що в режимі генератора $U_a \le E_a$, а в режимі двигуна $U_a \ge E_a$.

4 Принцип оберненості машин постійного струму

Ґрунтуючись на розглянутому принципу дії машини постійного струму, можна зробити висновок, що будь-яка машина постійного струму може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Така якість притаманна всім типам обертових електричних машин і називається ***оберненністю***. Можливість зміни режиму роботи машини постійного струму пояснюється можливістю зміни напрямків моментів, ЕРС та струмів в окремих елементах (рисунок 2.11).

Таким чином, для зміни режиму роботи машини постійного струму при постійній полярності полюсів і щіток і при незмінному напрямі обертання необхідно змінити напрям струму в обмотці якоря.

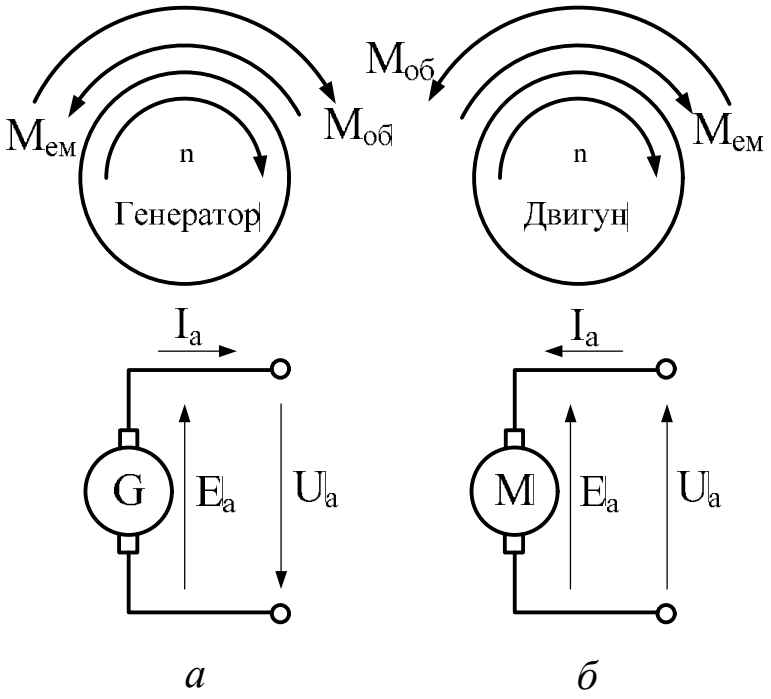


Рисунок 2.11 – Напрямки ЕРС, струму і моментів в генераторі (а) і двигуні (б) постійного струму

Контрольні запитання

1. Наведіть призначення машин постійного струму. Переваги і недоліки основних серій машин постійного струму.

2. З яких основних елементів складаються основні і додаткові полюси машини постійного струму? Призначення основних і додаткових полюсів.

3. З яких основних елементів складається якір машини постійного струму? Призначення якоря машини та особливості будови.

4. З яких основних елементів складається колектор машини постійного струму? Призначення та особливості будови колекторів.

5. З яких основних елементів складається щітковий апарат машини постійного струму? Призначення та особливості будови окремих елементів щіткового апарату.

6. З яких основних функціональних частин складається узагальнена машина постійного струму?

7. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі генератора.

8. Сформулюйте принцип дії узагальненої машини постійного струму в режимі двигуна.

9. Яку функцію виконує колектор в машині постійного струму при роботі в різних режимах роботи?

10. Сформулюйте принцип оберненості машини постійного струму.