

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 8б

Тема: «Будова і принцип дії машин постійного струму»

ПЛАН

- 1. Типи й основні конструктивні елементи машин постійного струму;*
- 2. Принцип дії колекторної машини постійного струму;*
- 3. Обмотки машин постійного струму;*
- 4. Електрорушійна сила обмотки якоря та електромагнітний момент.*

1. Типи й основні конструктивні елементи машин постійного струму

Електричні машини постійного струму використовуються як генератори, і як двигуни. Найбільше застосування мають двигуни постійного струму, області застосування і діапазон потужності яких досить широкі: від часток ватів (для приводу пристроїв автоматики) до декількох тисяч кіловатів (для приводу прокатних станів, шахтних підйомників і інших механізмів). Двигуни постійного струму широко використовуються для приводу підйомних засобів як кранові двигуни і приводу транспортних засобів як тягові двигуни. Основні переваги двигунів постійного струму порівняно з безколекторними двигунами змінного струму - хороші пускові і регульовальні властивості, можливість одержання частоти обертання понад 3000 об/хв., а недоліки - відносно висока вартість, деяка складність у виготовленні і знижена надійність. Усі ці недоліки машин постійного струму зумовлені наявністю в них щітково-колекторного вузла, що до того ж є джерелом радіоперешкод і пожежо-небезпеки. Ці недоліки обмежують застосування машин постійного струму.

В останні роки створені й успішно застосовуються двигуни постійного струму, у яких колектор замінений безконтактним комутатором на напівпровідникових елементах, однак подібні двигуни виготовляються на потужності не більше 500 Вт.

Машиною постійного струму називають обертову електричну машину, яка перетворює механічну енергію в електричну (у випадку генератора) і виконує зворотне перетворення (у випадку двигуна).

За конструктивним виконанням розрізняють два типи машин постійного струму:

1. уніполярні машини постійного струму;
2. колекторні машини постійного струму.

Уніполярні (безколекторні) машини постійного струму серійно не випускаються, тому що вони мають низькі техніко-економічні показники і застосовуються тільки у спеціальних установках і виготовляються як машини індивідуального виконання.

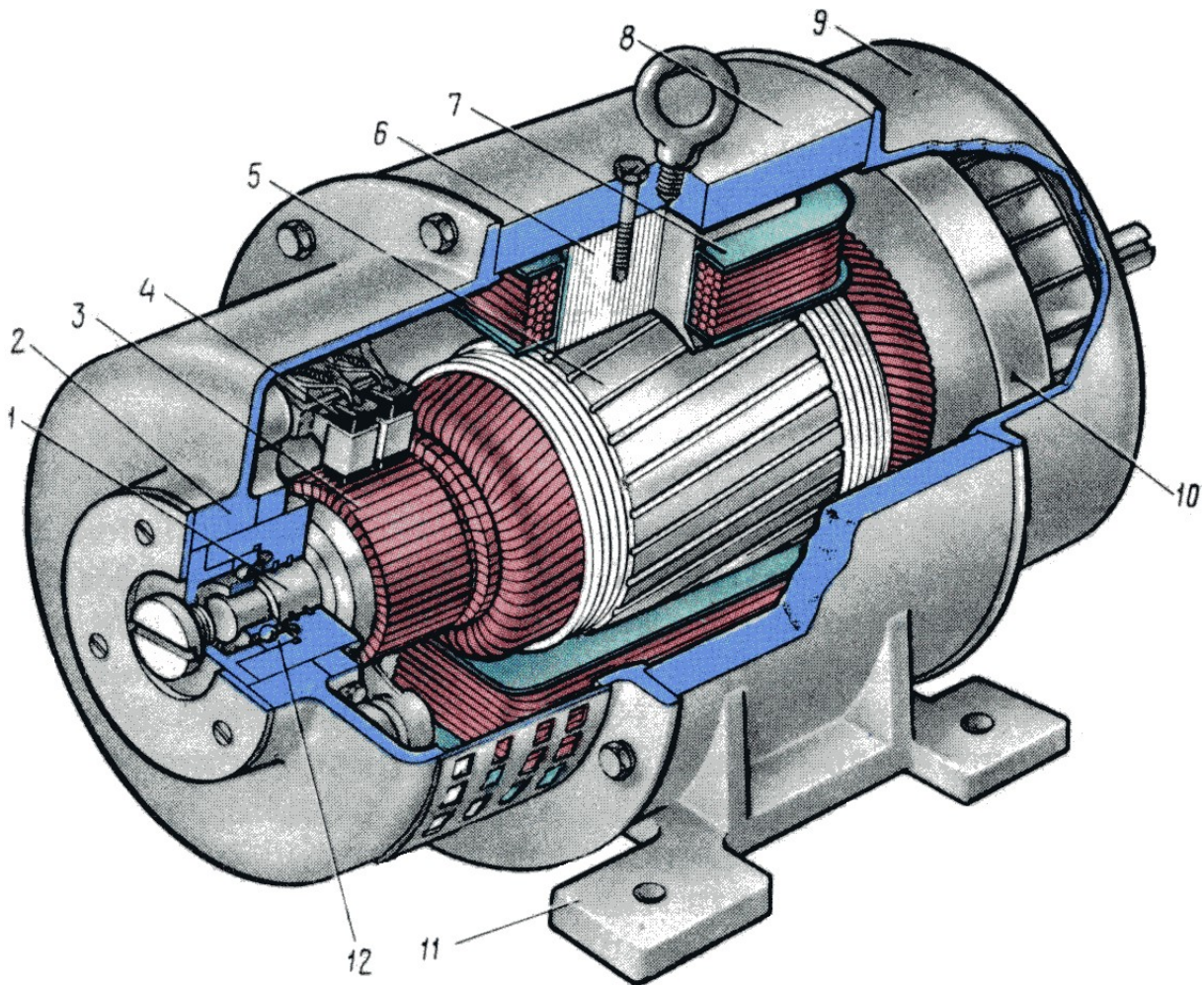
Колекторні машини постійного струму є їх основним типом. Тому, коли говорять про машини постійного струму, мають на увазі цей тип машин.

В даний час електромашинобудівні заводи виготовляють електричні машини постійного струму для роботи в різноманітних галузях промисловості, тому окремі вузли цих машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема машин однакова. Нерухома частина машини постійного струму називається статором (індуктором), обертова частина - ротором (якорем), розділених повітряним зазором.

Статор складається зі станини, на внутрішній поверхні якої кріпляться головні і додаткові полюси з обмотками. Головні полюси служать для створення в машині основного магнітного потоку, а додаткові - для поліпшення умов комутації машини.

Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Вал встановлюється в підшипниках, розташованих в підшипникових щитах. Для кращого охолодження в більшості машин є вентилятор.

На мал. 19.1 показана будова електричної машини постійного струму. Розглянемо конструктивну будову окремих вузлів машини постійного струму.



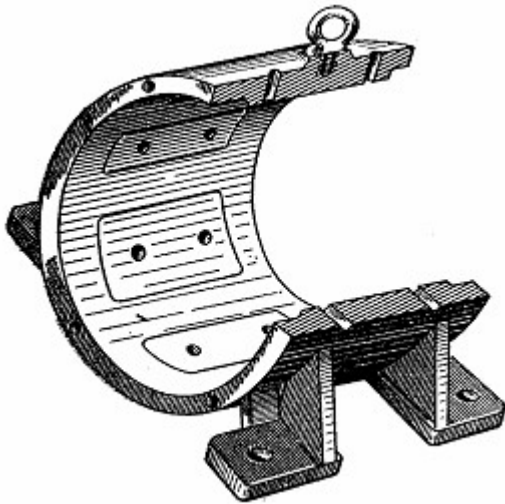
1 – вал; 2 – передній підшипниковий щит; 3 - колектор; 4 - щітки; 5 - осердя якоря; 6 - осердя головного полюса; 7 - полюсна котушка; 8 - станина; 9 - задній підшипниковий щит; 10 - вентилятор; 11 – лапи; 12 - підшипник

Мал. 19.1 Будова електричної машини постійного струму:

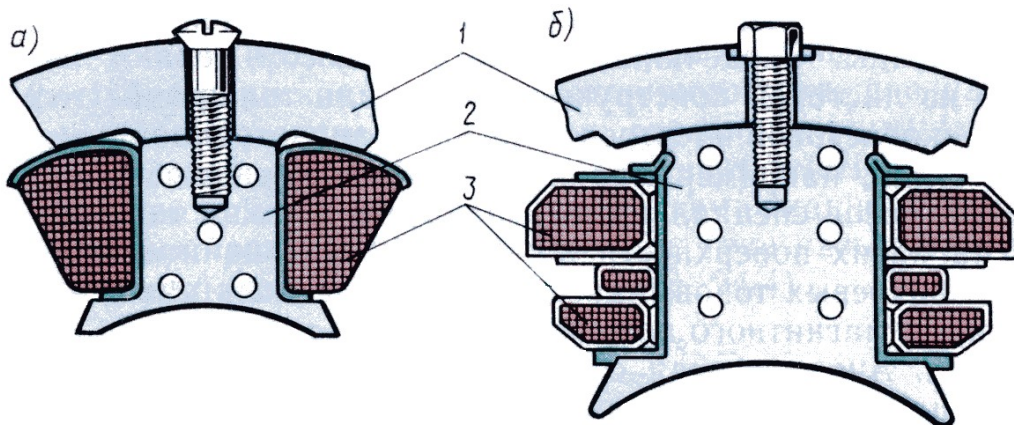
Станина. Станина 8 (мал. 19.2) машини постійного струму служить для кріплення полюсів і підшипникових щитів. Крім того, станина є магнітопроводом, тому що по ній замикається основний магнітний потік машини. Тому станини машин постійного струму виготовляються зі сталі - матеріалу, який має достатню механічну міцність і велику магнітну проникність. Для кріплення машини до фундаменту станина має відлиті або приварені лапи 11 з отворами для болтів. По окружності станини є отвори для кріплення головних і додаткових полюсів. У верхній частині станина має піднімальне кільце (рим-болт), що служить для підйому машини при її зборці та монтажі.

В машинах малої і середньої потужності станина виконується як правило зі сталевих прокату у вигляді цільної конструкції. У великих машинах в станину

може бути запресований пакет сталі, набраний з окремих, ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі. Для полегшення монтажу і транспортування у великих машинах станини роблять роз'ємними.



Головні полюси. Магнітне поле в машині постійного струму створюється магніторухійною силою обмотки збудження, що виконується у вигляді полюсних котушок надітих на осердя головних полюсів (мал. 19.3). З боку, зверненого до якоря, осердя закінчується полюсним наконечником, за допомогою якого забезпечується необхідний розподіл магнітної індукції на поверхні якоря.



1 - станина; 2 - осердя полюса; 3 - полюсна котушка

Мал. 19.3 Головні полюси з безкаркасною (а) і каркасною (б) полюсними котушками:

Осердя головних полюсів роблять шихтованими з листової конструкційної сталі товщиною 1-2 мм або з тонколистової електротехнічної анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад марки 3411. Штамповані пластини головних полюсів спеціально не ізолюють, тому що тонка плівка окислу на їхній поверхні достатня для значного послаблення вихрових струмів, наведених в полюсних

наконечниках пульсаціями магнітного потоку, викликаного зубчатістю осердя якоря. Анізотропна сталь має підвищену магнітну проникність уздовж прокату, що повинно враховуватися при штампуванні пластин і їхній зборці в пакет. Знижена магнітна проникність впоперек прокату сприяє ослабленню реакції якоря і зменшенню потоку розсіювання головних і додаткових полюсів.

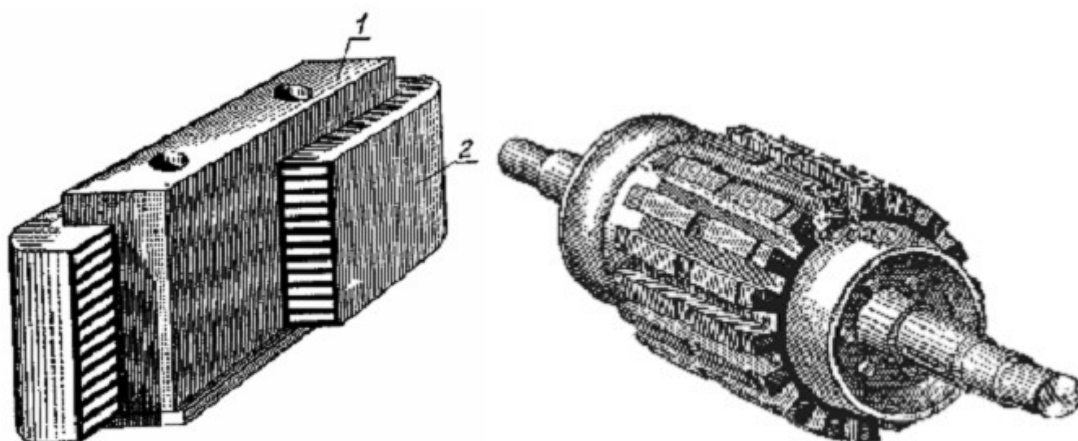
В машинах постійного струму невеликої потужності полюсні котушки роблять безкаркасними - намотуванням мідного обмотувального проводу безпосередньо на осердя полюса, попередньо наклавши на нього ізоляційну прокладку (мал. 19.3, *а*). У більшості машин (потужністю 1 кВт і більше) полюсну котушку роблять каркасною: обмотувальний провід намотують на каркас (як правило пластмасовий), а потім надівають на осердя полюса (мал. 19.3, *б*). В деяких конструкціях машин полюсну котушку для інтенсивнішого охолодження розділяють по висоті на частини, між якими залишають вентиляційні канали.

Додаткові полюси. Додаткові полюси застосовують в машинах потужністю понад 1 кВт із метою зменшення іскріння на щітках.

Додатковий полюс (мал. 19.4) складається із осердя 1 і котушки 2, виконаної з мідного ізольованого проводу з перетином, розрахованим на робочий струм машини, тому що котушки додаткових полюсів включаються послідовно з обмоткою якоря. Осердя додаткового полюса виготовляється зі сталі, і має як правило монолітну конструкцію. Через малу величину магнітної індукції в осердях додаткових полюсів у них практично не індукуються вихрові струми. Додаткові полюси встановлюються посередині між головними полюсами і кріплять до станини болтами.

Якір. Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Осердя якоря (мал. 19.5) являє собою циліндр, набраний зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 мм (мал. 19.6). Така конструкція осердя якоря дозволяє значно послабити в ньому вихрові струми, що виникають в результаті його перемагнічування в процесі обертання в магнітному полі. Листи покривають ізоляційним лаком, збирають в пакет і запікають. У машин малої потужності пакет сталі якоря надівають на вал, а у великих машинах на

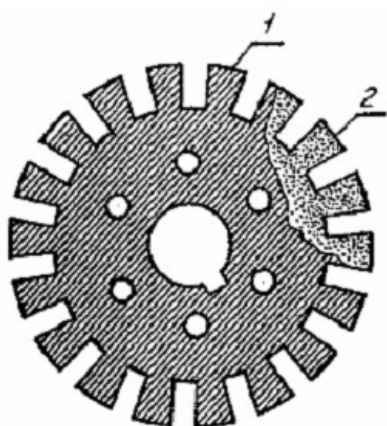
хрестовину. У великих машинах пакет осердя якоря може набиратися не із суцільних листів, а з окремих сегментів.



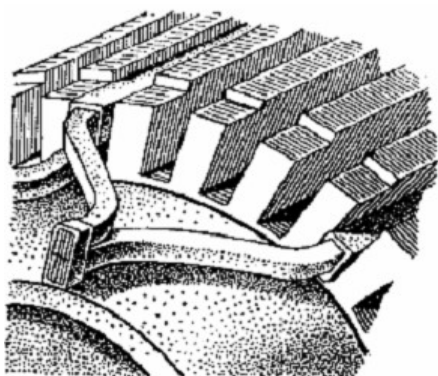
Мал. 19.4 Додатковий полюс 1 - осердя; 2 – котушка Мал. 19.5 Якір без обмотки

Для поліпшення охолодження машини в пакеті сталі якоря можуть виконуватися вентиляційні канали в осьовому і радіальному напрямках.

На зовнішній поверхні осердя якоря є повздовжні пази, в які укладають обмотку якоря (мал. 19.7).



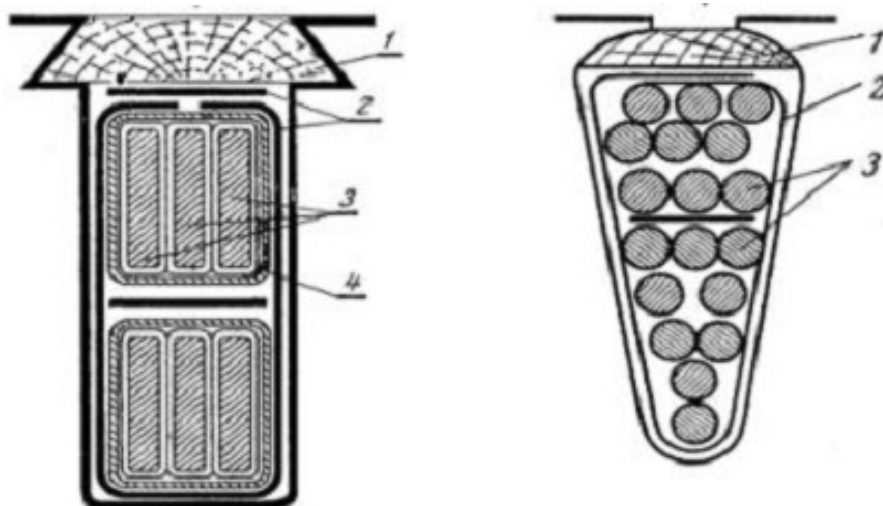
Мал. 19.6 Сталевий лист якоря: 1 - сталь; 2 - ізоляція



Мал. 19.7 Укладання обмотки якоря в пазах осердя

Обмотку якоря виконують з мідного проводу круглого чи прямокутного перетину і розташовують в пазах осердя якоря, де вона ретельно ізолюється від осердя. Пази осердя якоря можуть бути відкритими (мал. 19.8, *a*) або напівза-

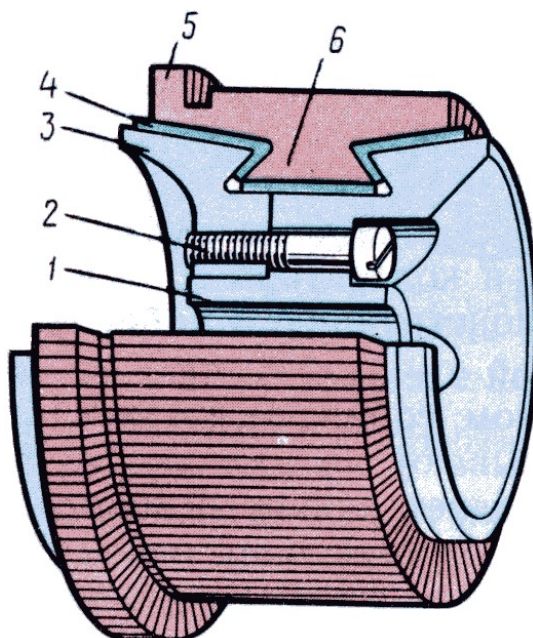
критими (мал. 19.8, б). Відкриті пази застосовують в машинах середньої і великої потужності, а напівзакриті - в машинах малої потужності.



Обмотка якоря складається із секцій, кінці яких припаюються до пластин колектора.

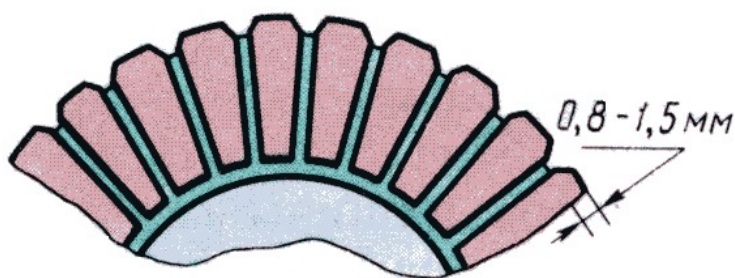
Для міцного закріплення проводів обмотки якоря в пазах застосовуються дерев'яні, гетинаксові або текстолітові клини. Застосування дерев'яних клинів не забезпечує надійного кріплення, тому що при висиханні вони слабшають і можуть випасти з паза. В машинах малої потужності пази не заклинюються, а прикриваються зверху бандажем. Для того, щоб бандаж не виступав за межі якоря, місце під бандаж роблять трохи меншого діаметра (див. мал. 19.5). Бандаж виконується зі сталевого або бронзового дроту, намотаного безпосередньо на сталь якоря. Лобові частини обмотки кріпляться до обмоткотримача також за допомогою дротового бандажа.

Колектор машини (мал. 19.9) виконують із пластин холоднокатаної міді (колекторна мідь), які ізолюють одну від одної прокладками з колекторного міканіту. Виступаючу частину колекторної пластини називають "півником", до неї припаюють провід обмотки якоря. Нижні краї пластини мають форму "хвоста ластівки". Після зборки колектора ці краї затискаються між двома натискними шайбами, ізольованими від колекторних пластин міканітовими конусами і циліндрами. Щоб міканітові прокладки при спрацьовуванні пластин колектора не виступали над пластинами, що викликало би вібрацію щіток, іскріння і передчасне зношування щіток, між колекторними пластинами фрезерують пази (доріжки) на глибину до 1,5 мм (мал. 19.10).



1 - корпус колектора; 2 - стяжний болт; 3 - натискне кільце; 4 - ізоляція (міканіт); 5 - "півник"; 6 - "хвіст ластівки"; 7 - пластини.

Мал. 19.9 Будова колектора:

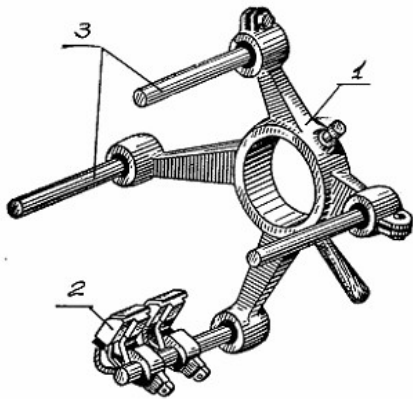


Колектори електричних машин малої потужності часто виконуються шляхом запресовування мідних пластин в пластмасу. Пластмаса в цьому випадку є скріплюючим і ізолюючим матеріалом. Така конструкція колектора проста у виготовленні, але може застосовуватися лише при частотах обертання до 10000 об/хв.

Щітковий пристрій. Для одержання електричного контакту з поверхнею колектора в машині постійного струму є щітки. Для установки щіток в машині служить щітковий пристрій, що складається з щіткової траверзи (мал. 19.11), пальців, щікотримачів (мал. 19.12).

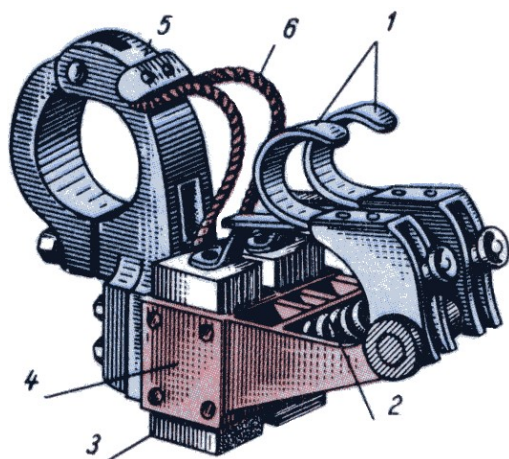
Щіткова траверза як правило кріпиться до підшипникового щита і тільки в машинах великої потужності вона кріпиться до станини. Між щітковою траверзою і пальцями є ізоляція. На кожен палець установлюють комплект щікотримачів. Число пальців як правило дорівнює числу полюсів в машині. Щікотримач складається з обойми, в яку поміщають щітку, курка, що представляє собою

відкидну деталь, яка передає тиск пружини на щітку. Кріплення щіткотримача на пальці здійснюється за допомогою затискача. Для приєднання елементів електричного кола машини до щітки остання забезпечується гнучким тросиком. Усі щіткотримачі однієї полярності з'єднують між собою збірними шинами, приєднаними до виводів машини.



1 - щіткова траверза; 2 - щіткотримач; 3 - пальці.

Мал. 19.11 Щітковий пристрій:



1 - курок; 2 - пружина; 3 - щітка; 4 - обойма; 5 - затискач; 6 - тросик.

Мал. 19.12 Щіткотримач

Окрім зазначених частин машина має два підшипникових щити: передній (з боку колектора) і задній. Щити за допомогою болтів кріпляться до станини. В центральній частині щита є розточка, де розташовується підшипник. Як правило в машинах застосовуються кулькові або роликові підшипники кочення; лише в деяких машинах, з метою забезпечення безшумності в процесі роботи, застосовуються підшипники ковзання.

Для приєднання обмоток машини до електричної мережі машина забезпечується коробкою виводів, де на ізоляційній панелі робляться виводи кінців обмоток. Як правило панель з виводами розташовують на станині.

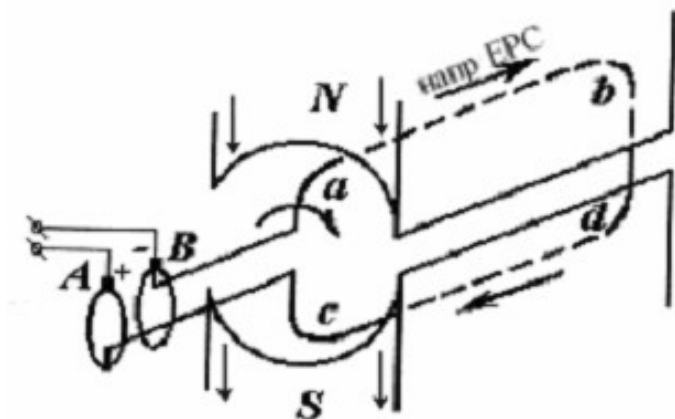
Виводи обмоток машин постійного струму, відповідно до ДСТУ 183-66, позначаються у такий спосіб:

Обмотка якоря	<i>Я1 і Я2</i>
Обмотка додаткових полюсів	<i>Д1 і Д2</i>
Обмотка компенсаційна	<i>К1 і К2</i>
Обмотка збудження паралельна (шунтова)	<i>Ш1 і Ш2</i>
Обмотка збудження послідовна (серієсна)	<i>С1 і С2</i>

Цифрою 1 позначені початки обмоток, а цифрою 2 - кінці.

2. Принцип дії колекторної машини постійного струму

Для розуміння принципу роботи колекторної машини постійного струму доцільно розглянути роботу найпростішої моделі машини змінного струму. Ця модель складається з двох нерухомих у просторі полюсів, між якими обертається рамка, кінці якої з'єднані з контактними кільцями (мал. 19.13).



Мал. 19.13. Принципова схема машини постійного струму

В представленій моделі, при обертанні рамки, в провідниках *ab* і *cd* індукується ЕРС, напрямок якої визначається за правилом правої руки.

З малюнку 19.13 видно, що для розглянутого моменту часу, якщо вважати, що модель працює генератором, щітка А має полярність «+», а щітка В має полярність «-», тому що в генераторі струм тече від «+» у зовнішньому колі до «-». Якщо повернути рамку на 180° , видно, що полярність щіток зміниться на протилежну. Таким чином, в цій моделі знімається з щіток змінна в часі ЕРС.

Установлюючи закон зміни ЕРС в часі, враховуємо, що миттєве значення ЕРС провідників визначається:

$$e_{np} = B_x l v, \quad (19.1)$$

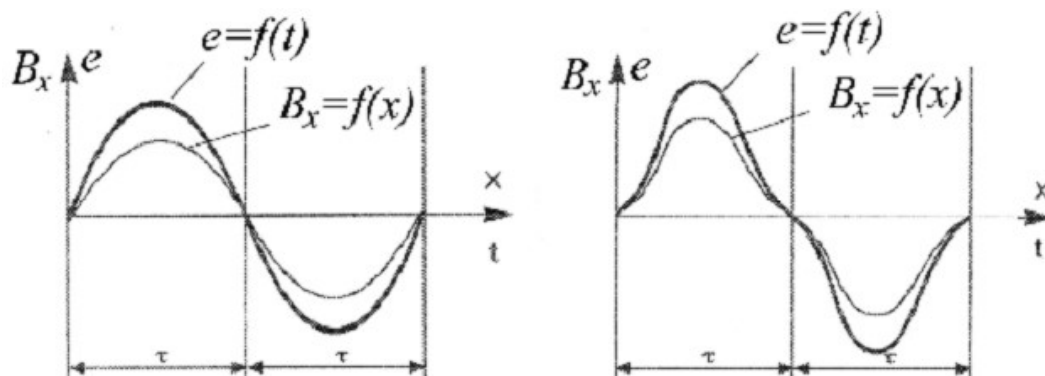
де B_x - індукція в місці розташування провідника в даний момент часу; l - довжина активної частини провідника; v - лінійна швидкість переміщення провідника відносно поля.

Якщо врахувати, що довжина провідника $l = const$, то при рівномірному обертанні рамки $v = const$ ЕРС провідника $e_{np} \approx B_x$.

Таким чином, зміна ЕРС провідників в часі і, відповідно, зміна ЕРС на виході генератора відбувається за тим же законом, що і розподіл індукції уздовж кола руху рамки на кожному полюсному поділі.

Якщо прийняти, що закон зміни магнітної індукції в часі $B_x = f(x)$ змінюється за синусоїдальним законом, то і ЕРС $e = f(t)$ також буде змінюватися за синусоїдальним законом (мал. 19.14, а).

У дійсності, магнітне коло машини завжди трохи насичене, тому закон зміни індукції $B_x = f(x)$ і ЕРС $e = f(t)$ представимо у виді залежностей (мал. 19.14, б).



Мал. 19.14. Зміна індукції в повітряному зазорі і ЕРС витка: а - при ненасиченій магнітній системі; б - при насиченій магнітній системі

Змінимо конструкцію моделі (мал. 19.13) у такий спосіб - замінимо кільця двома сегментами (мал. 19.15).

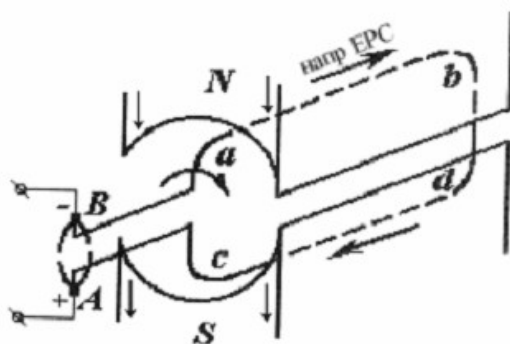


Рис. 19.15. Принципова схема машини постійного струму

При обертанні рамки в провідниках ab і cd , як і попередньої моделі (мал. 19.13), індукується змінна в часі ЕРС.

Однак, в цій моделі при будь-якому положенні рамки, щітка «А» завжди з'єднана з тим проводом, що розташований під полюсом «S», а щітка «В»- під полюсом «N».

Таким чином, в новій моделі полярність щіток не змінюється, тобто при зазначеному на мал. 19.15 напрямку обертання рамки, щітка «А» є позитивною, а щітка «В» негативною.

Таким чином, за допомогою двох сегментів, що представляють найпростіший комутатор, здійснюється випрямлення змінної в часі ЕРС у постійну. Тому з щіток «А» і «В» знімається ЕРС, що пульсує в часі за законом (рис. 19.16, а).

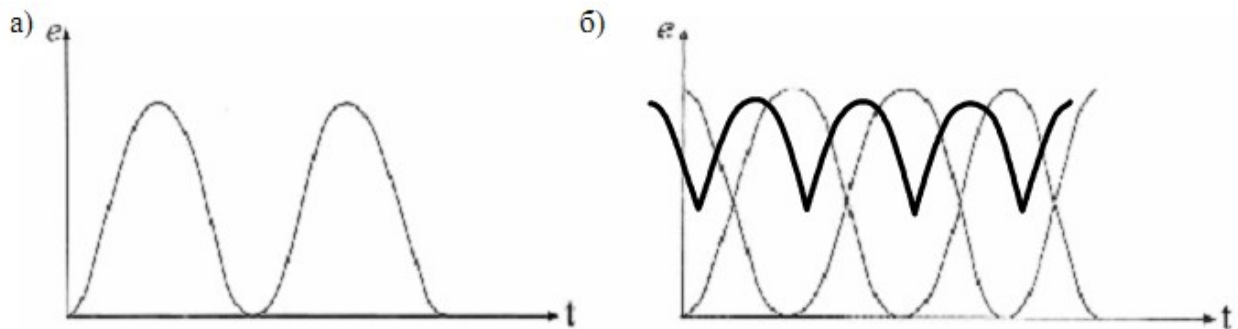


Рис. 19.16. Пульсуюча ЕРС при одному (а) і двох (б) витках на якорі

Якщо ми накладемо на якір два витки (дві котушки) під кутом 90° один до одного, то пульсації напруги на щітках значно зменшаться (мал. 19.16, б). Підрахунок показує, що вже при восьми колекторних пластинах на полюс пульсації напруги на щітках не перевищують 1% від середнього значення цієї напруги; тому струм, що тече по зовнішньому колі, можна вважати практично постійним струмом.

3. Обмотки машин постійного струму

А. Принцип будови обмоток якорів

Обмотка якоря машини постійного струму являє собою замкнену систему провідників, певним чином покладених на осердя якоря і приєднаних до колектора. Елементом обмотки якоря є *секція* (котушка), приєднана до двох колекторних пластин.

За конструктивним виконанням секції розрізняють *петльові*, *хвильові* та *комбіновані* обмотки якоря.

Схематично секції обмотки якоря представлені на малюнках 19.17 і 19.18.

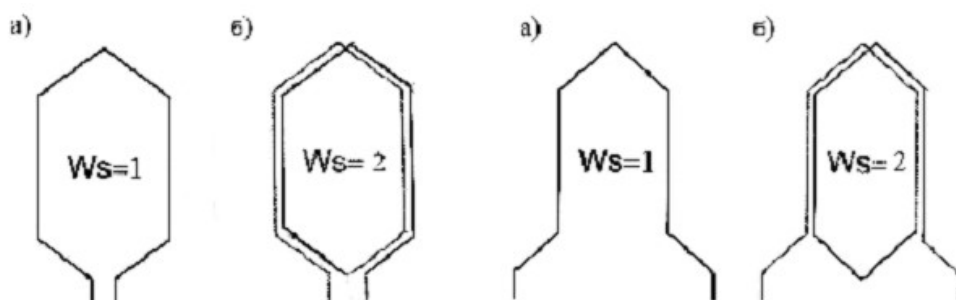


Рис. 19.17 Секції петльової обмотки:
а - одновиткова; б - двовиткова

Рис. 19.18 Секції хвильової обмотки:
а - одновиткова; б - двовиткова

Як правило секції обмотки якоря виконуються одновитковими і тільки в машинах малої потужності вони можуть бути виконані багатовитковими.

В обмотці якоря секції з'єднуються послідовно через загальну колекторну пластину. Схематично з'єднання секцій обмотки якоря представлено на мал. 19.19.

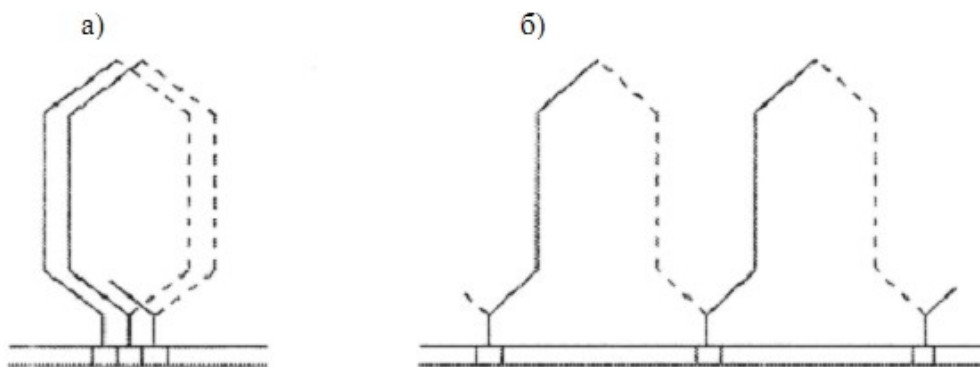
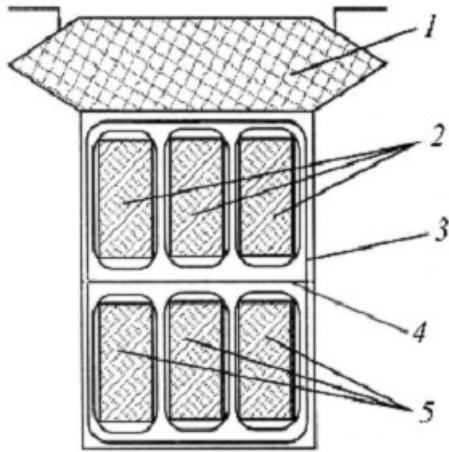


Рис. 19.19. З'єднання секцій петльової (а) і хвильової (б) обмоток якоря

Обмотки якоря як правило виконують двошаровими. При укладанні в пази одна сторона секції укладається в верхній шар паза, а інша сторона, розташована на відстані u_1 , укладається в нижній шар паза (на схемі показана пунктиром).

Число секцій S завжди дорівнює числу колекторних пластин K . Однак, число пазів на якорі Z може бути меншим числа секцій S і колекторних пластин K . В цьому випадку в кожному пази якоря u_n сторін секцій в верхньому і нижньому шарі. Схематично реальний паз, що складається з трьох елементарних пазів, показаний на мал. 19.20.

У тих випадках, коли число сторін секцій у пази $u_n > 1$ приймають, що реальний паз на якорі складається з u_n елементарних пазів. Таким чином, за елементарний паз якоря приймається такий умовний паз, в верхньому і нижньому шарі якого розташовані по одній стороні секції.



1 - пазовий клин; 2 - сторони секцій верхнього шару паза; 3 - пазова ізоляція; 4 - ізоляційна прокладка; 5 - сторони секцій нижнього шару паза

Рис. 19.20. Реальний паз машини постійного струму

Число елементарних пазів Z_e , дорівнює числу секцій S і числу колекторних пластин K :

$$Z_e = S = K.$$

При виконанні розгорнутої схеми обмотки вона приводиться не в реальних пазах, а в елементарних пазах для більшої наочності. Обмотки якорів можуть виконуватися рівносекційними (мал. 19.21, а) або східчастими (мал. 19.21, б).

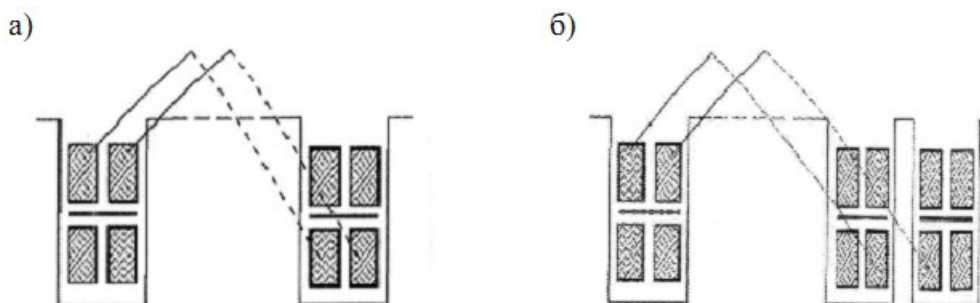


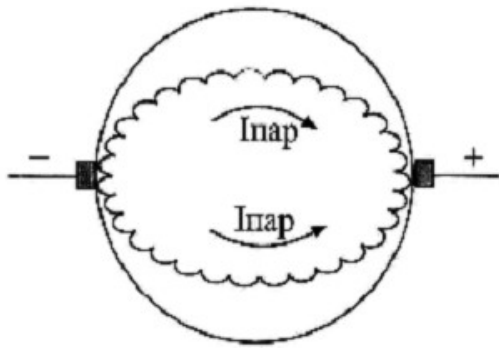
Рис. 19.21. Обмотки якоря: а - рівносекційні; б - східчасті

Обмотка якоря, в найпростішому випадку, має одну пару паралельних гілок. Якщо умовно сполучити поверхню якоря і поверхню колектора, то цю пару паралельних гілок можна представити у такий спосіб (мал. 19.22).

ЕРС секцій в межах кожної паралельної гілки додаються. Оскільки гілки з'єднуються паралельно, то ЕРС всієї обмотки якоря визначається величиною ЕРС однієї паралельної гілки тоді як величина струму якірної обмотки дорівнює сумі струмів усіх віток обмотки:

$$I_a = 2a I_{нар},$$

де I_a - величина струму обмотки якоря; $I_{пар}$ - величина струму однієї паралельної гілки; $2a$ - число паралельних гілок.



Мал. 19.22. Розподіл струму в обмотці якоря

Обмотка якоря знаходиться в найкращих умовах, якщо струми паралельних гілок однакові. Для цього необхідно, щоб ЕРС паралельних гілок були однаковими.

Для забезпечення цієї умови при проектуванні обмотки виконують такі умови **симетрії**:

- 1) на кожен пару паралельних гілок повинно приходиться ціле число секцій і колекторних пластин:

$$S \text{ к } Z_e$$

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{Z_e}{a} = \text{ціле число.}$$

- 2) для симетричного розташування паралельних гілок в магнітному полі необхідно щоб:

$$2p/a = \text{ціле число,}$$

де $2p$ - число головних полюсів машини; a - число пар паралельних гілок.

Якщо виконані ці умови, обмотка якоря називається *симетричною*.

Б. Характеристика основних типів обмоток якорів

Як відзначалося, обмотки якорів поділяють на *петльові*, *хвильові* і *комбіновані*. Петльові і хвильові обмотки, в свою чергу, можуть виконуватися як *прості* і *складні*.

Проста петльова обмотка. Ця обмотка може бути виконана в двох варіантах послідовного з'єднання секцій (мал. 19.23).

В першому варіанті при обході послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря рухаємося управо, тому обмотка називається *правоходовою*. В другому варіанті - рухаємося уліво, тому обмотка називається *лівоходовою*.

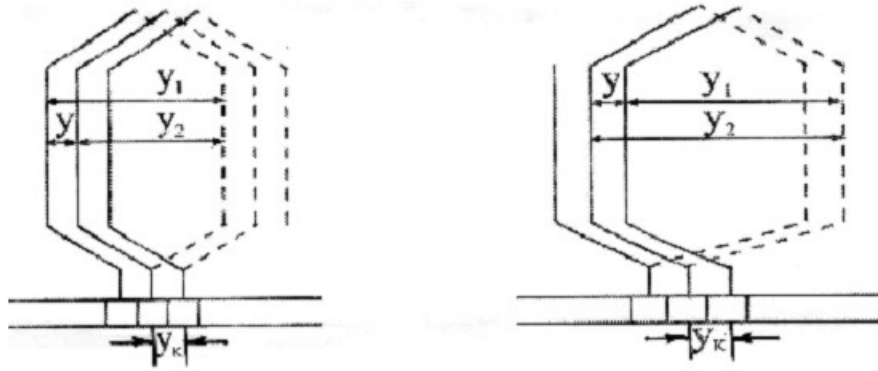


Рис. 19.23. Кроки петльової обмотки: а - правоходова обмотка; б - лівоходова обмотка

В петльовій обмотці розрізняють такі кроки:

y_1 - перший частковий крок - є відстань між сторонами даної секції;

y_2 - другий частковий крок - є відстань від сторони даної секції до найближчої сторони послідовно з'єднаної з нею секції;

y - результуючий крок обмотки;

y_k - крок по колектору.

Перераховані кроки обмотки знаходяться в такому співвідношенні:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon \quad (\text{елементарних пазів}) \quad (19.2)$$

де ε - позитивний чи негативний дріб, що робить y цілим числом.

$$y_2 = y - y_1 \quad (19.3)$$

Ці співвідношення між кроками обмотки справедливі для всіх типів обмоток якорів.

Характерною рисою простої петльової обмотки є те, що її результуючий крок $y = \pm 1$; «+» для правоходової обмотки; «-» для лівоходової обмотки.

Проста петльова обмотка має число паралельних віток $2a = 2p$, тобто залежна від числа головних полюсів машини.

Приклад 19.1. Виконати розгорнуту схему простої петльової обмотки якоря для чотириполюсної ($2p = 4$) машини постійного струму. Обмотка правоходова. Секції одновиткові. Осердя якоря має $Z = 14$ пазів, при цьому в кожному пазу розташовано по дві активні сторони, тобто $Z = Z_e$.

Розв'язок. 1. Визначаємо кроки обмотки:

перший частковий крок по якорю

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4;$$

другий частковий крок по якорю

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3;$$

крок по колектору

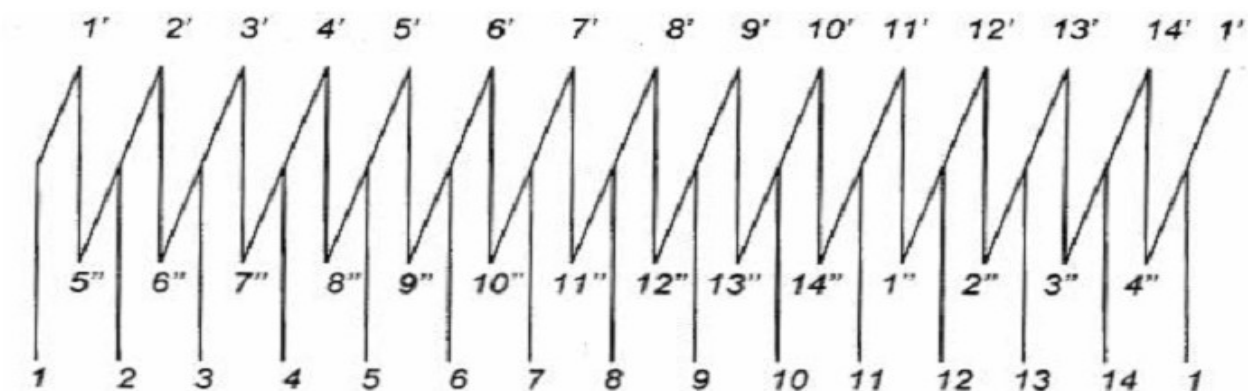
$$y_k = y = +1.$$

При виконанні розгорнутої схеми обмотки верхні сторони секцій в пазу будемо зображувати суцільними лініями, нижні - пунктирними.

Однієї і тією ж цифрою позначасмо помер паза, номер секції і номер колекторної пластини. Тому що в пазу знаходяться дві активних сторони - одна у верхньому шарі, а інша в нижньому шарі, то при складанні обмотувальної таблиці верхню сторону позначасмо номером паза зі штрихом, нижню того ж паза - із двома штрихами, а номер колекторної пластини - відповідним номером паза.

2. Складаємо обмотувальну таблицю (табл. 19.1).

таблиця 19.1



3. Користуючись таблицею, креслимо розгорнуту схему обмотки.

Як правило активні сторони секцій і її частини розташовуємо симетрично до колекторних пластин, до яких приєднуються секції (мал. 19.24).

4.1 Розставляємо щітки на колекторі. Вони встановлюються по лініях геометричних нейтралей (по центру (осі) полюсів) на відстані:

$$\tau = \frac{Z_a}{2p} = \frac{14}{4} = 3.5 \text{ п.п. (пазових поділів).}$$

4.2 Розставляємо полюси. Ширина полюсного наконечника

$$b_n = (0,65 \div 0,75)\tau; \quad b_n = 0,75 \cdot 3,5 = 2,625.$$

4.3 Вибираємо напрямок обертання обмотки якоря і визначаємо напрямок ЕРС в секціях обмотки.

4.3 Визначаємо полярність щіток.

4.4 Виділяємо короткозамкнені секції.

5. Складаємо електричну схему обмотки (мал. 19.25)..

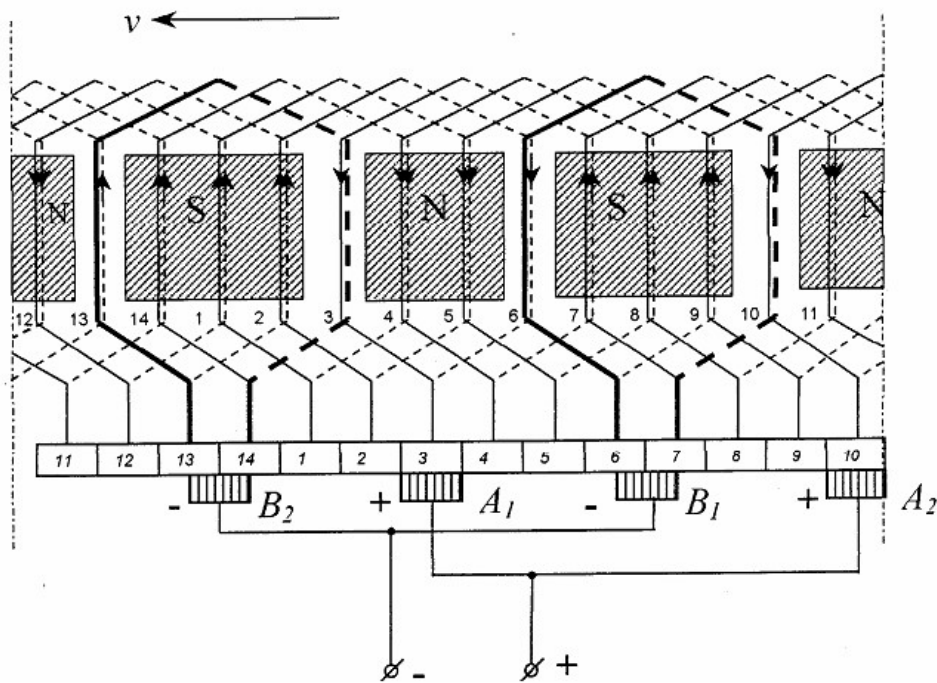


Рис. 19.24. Розгорнута схема простої петльової обмотки: $2P = 4$; $S = 14$

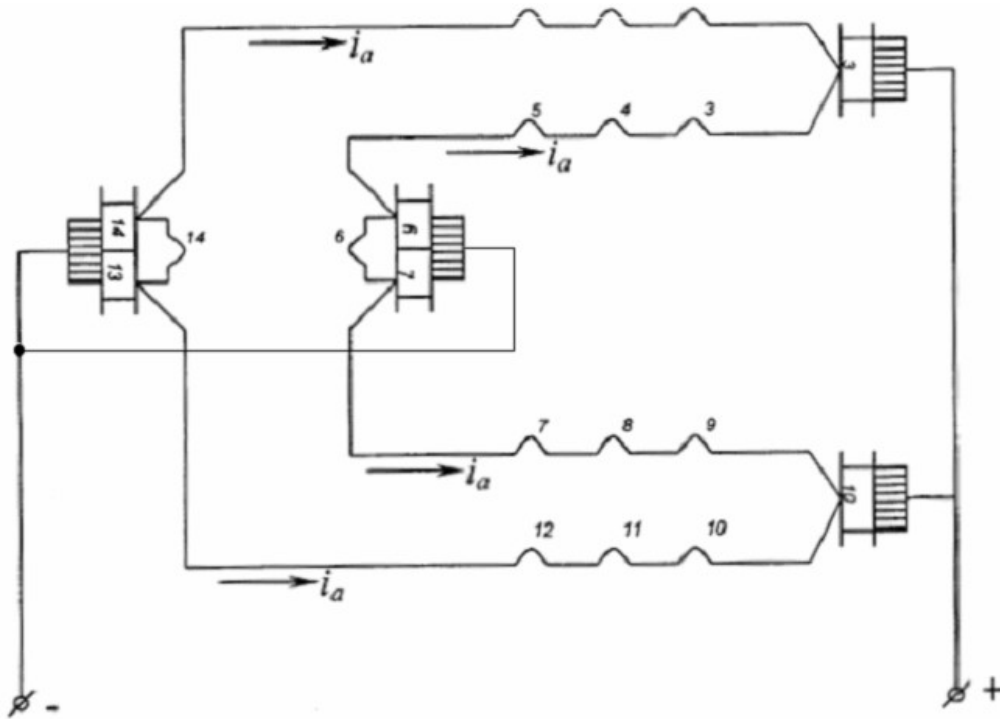
Складна петльова обмотка. В простій петльовій обмотці число паралельних гілок дорівнює числу головних полюсів машини. Тому при бажанні отримати обмотку з великим числом паралельних гілок, наприклад, як це потрібно в низьковольтних машинах, довелося б робити машину багатополусною. Це несприятливо відбилося б на її розмірах і вартості. Отже, при необхідності одержати обмотку з великим числом паралельних гілок застосовують складну петльову обмотку. Така обмотка як правило являє собою декілька простих петльових обмоток, покладених на один якір. Число паралельних гілок в складній петльовій обмотці:

$$2a - 2pt,$$

де m - коефіцієнт кратності, що визначає число простих петльових обмоток, з яких складена складна обмотка.

Ширина щіток в машині зі складною петльовою обмоткою приймається таким, щоб кожна щітка одночасно перекривала не менше m колекторних пластин, тобто

стільки пластин, скільки простих обмоток міститься в складній. В цьому випадку прості обмотки виявляються приєднаними паралельно одна до одної.



Мал. 19.25. Електрична схема обмотки, що зображена на мал. 19.24

На мал. 19.26 показана частина складної петльової обмотки, що складається з двох простих ($m = 2$). Для того, щоб щітка з'єднувала паралельно ці обмотки довелося секційні сторони і колекторні пластини однієї обмотки розсунути і розмістити між ними секційні сторони і колекторні пластини другої обмотки. Тому крок обмотки по колектору і результуючий крок по якорю складної обмотки, порівняно з цими ж параметрами простої петльової обмотки, збільшився в m раз

$$y_k = y = m.$$

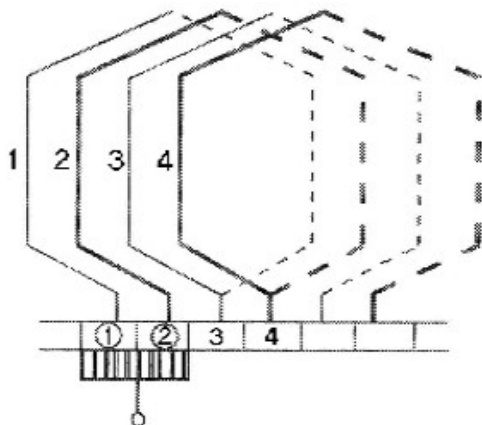


Рис. 19.26. Розташування секцій складної петльової обмотки

Перший частковий крок обмотки по якорі підраховується по відомій формулі

$$y = \frac{Z_2}{2p} m \varepsilon .$$

Проста хвильова обмотка. Проста хвильова обмотка виходить при послідовному з'єднанні секцій, що знаходяться під різними парами полюсів. Кінці секцій хвильової обмотки приєднані до колекторних пластин, віддалених одна від одної на відстань кроку обмотки по колекторі $y_k = y$. За один обхід по якорю укладається стільки секцій, скільки пар полюсів має машина, при цьому кінець останньої по обходу секції приєднують до колекторної пластини, розташованої поруч з вихідною.

Ця обмотка так само може бути виконана в двох варіантах послідовного з'єднання секцій (мал. 19.27).

В *1-му варіанті* - після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, розташованої ліворуч від вихідної пластини, тому вона називається лівоходовою (мал. 19.27, *а*).

В *2-му варіанті* - після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, що розташована праворуч від вихідної. Така обмотка називається правоходовою (мал. 19.27, *б*).

Тому що крок обмотки по колектору y_k охоплює простір по довжині окружності колектора, що відповідає парі полюсів, то зробивши один обхід по колектору, ми як би переміщаємося на число колекторних поділок, рівне $y_k p$, і переходимо до пластини, розташованої поруч з вихідною. На підставі сказаного можна записати:

$$y_k p = \kappa + 1,$$

звідки крок обмотки по колектору, а отже, і результуючий крок по якорю, тобто

$$y_k = y = \frac{\kappa \pm 1}{p}. \quad (19.4)$$

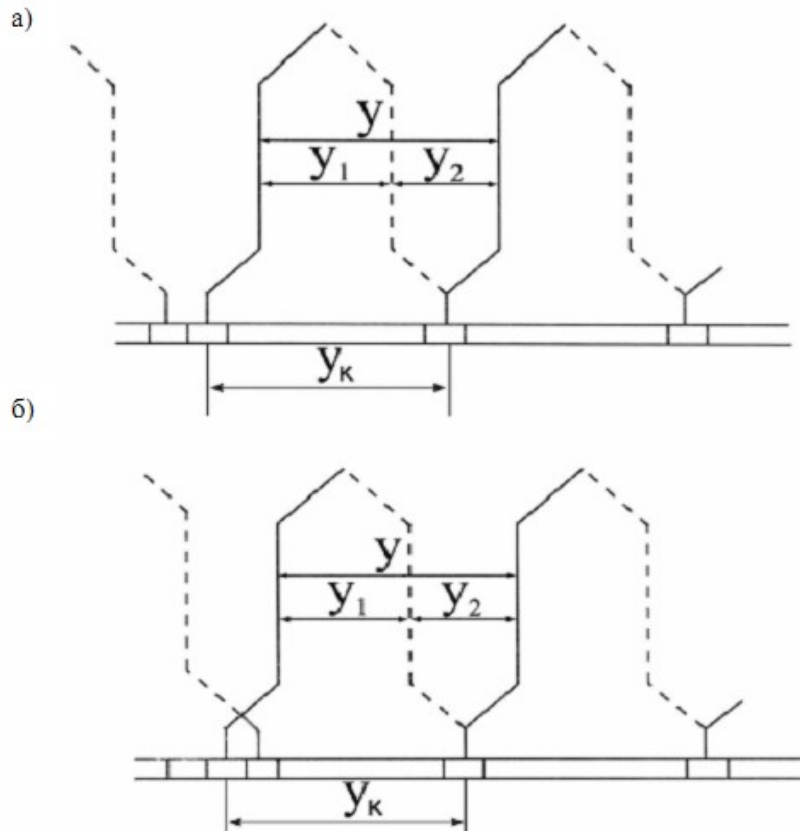
Знак "мінус" відповідає лівоходовій обмотці, а "плюс" - правоходовій.

Виконання правоходової обмотки зв'язано з додатковою витратою міді через перехреснування лобових частин секцій, тому вона майже не має практичного застосування.

Перший частковий крок обмотки по якорю визначається по формулі (19.2), а другий крок

$$y_2 = y - y_1$$

Розглянемо приклад побудови схеми простої хвильової обмотки.



Мал. 19.27.Схеми простої хвильової обмотки: а - лівоходова; б - правоходова

Приклад 19.2. Чотириполюсна машина постійного струму має просту хвильову обмотку якоря, що складається з $Z = 75$ секцій. Побудувати розгорнуту схему цієї обмотки, а також виконати її електричну схему.

Розв'язок. 1. Визначаємо кроки обмотки

$$y_k = y = \frac{\kappa \pm 1}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7;$$

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 7 - 4 = 3.$$

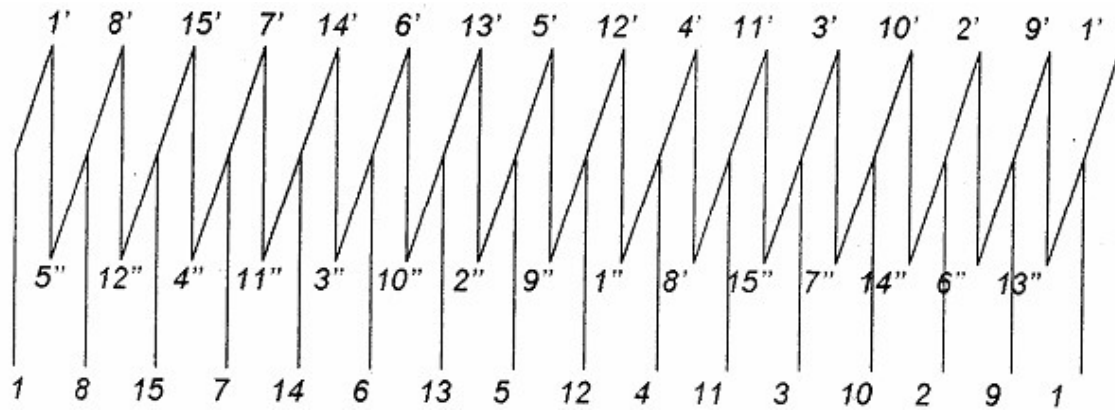
при виконанні розгорнутої схеми обмотки верхні сторони секцій у пазу будемо зображувати суцільними лініями, нижні - пунктирними.

Однією і тією ж цифрою позначаємо номер паза, номер секції і номер колекторної пластини. Тому що в пазу знаходяться дві активні сторони секцій - одна у верхньому шарі, а інша в нижньому шарі, то при складанні обмотувальної таблиці

верхню сторону позначаємо номером паза зі штрихом, нижню того ж паза - із двома штрихами, а номер колекторної пластини - відповідним номером паза.

2. Складаємо обмотувальну таблицю (табл. 19.2)

Таблиця 19.2



3. Користуючись таблицею, креслимо розгорнуту схему обмотки (мал. 19.28).

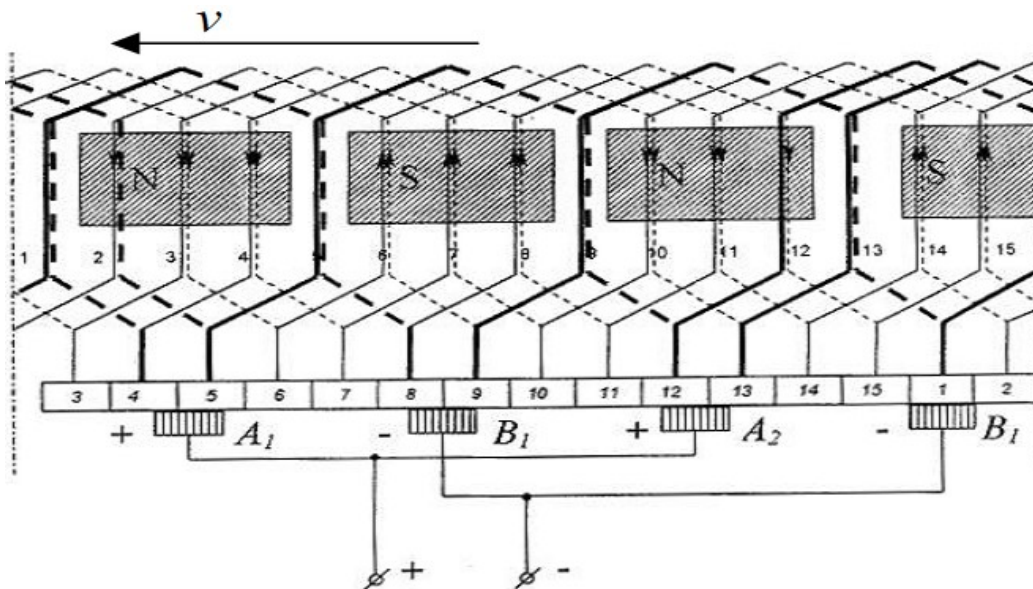


Рис. 19.28. Розгорнута схема простої хвильової обмотки: $2p = 4$; $S = 15$

Як правило активні сторони секцій і її лобових частин розташовуємо симетрично щодо колекторних пластин, до яких приєднуються секції.

При першому обході по якорі укладаємо секції 1 і 8 (мал. 19.28). Потім робимо другий обхід, третій і т.д., поки не будуть покладені всі п'ятнадцять секцій і обмотка не виявиться замкнутою.

3.1. Розставляємо щітки на колекторі. Вони встановлюються по лініях геометричних нейтралей (по центру (осі) полюсів) на відстані

$$\tau = \frac{Z_e}{2p} = \frac{15}{4} = 3.75 \text{ (пазових поділок).}$$

Жирними лініями на схемі показані секції, короткозамкнені щітками (при розглянутому положенні якоря).

3.2 Розставляємо полюси. Ширина полюсного наконечника:

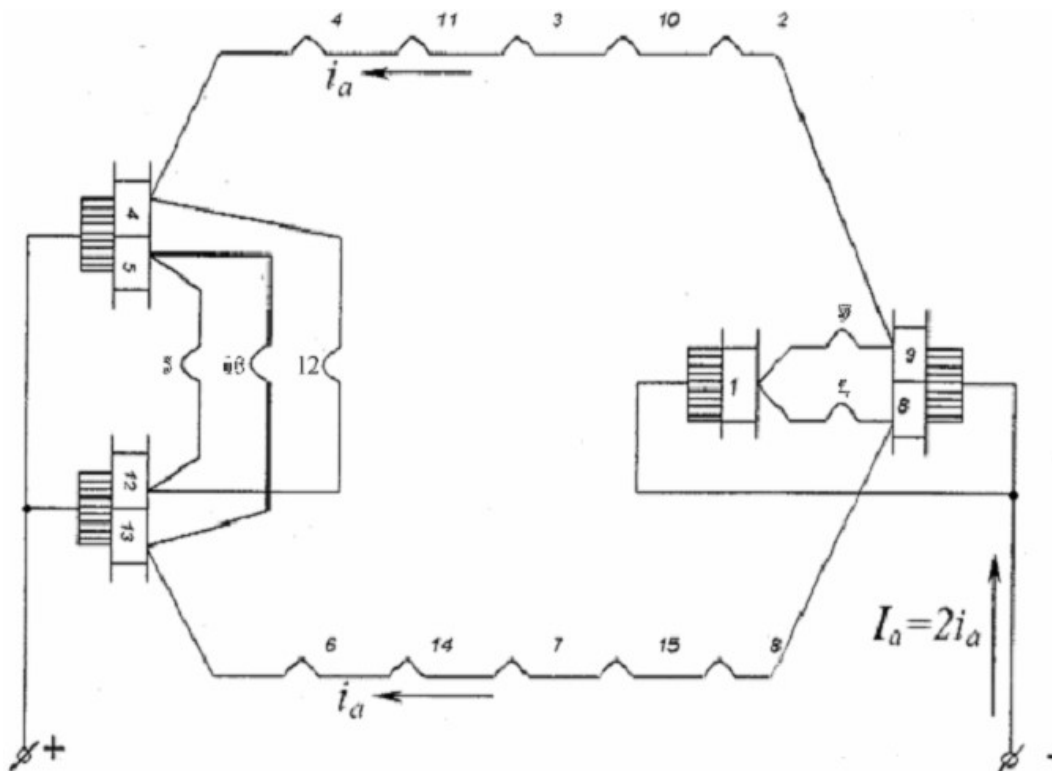
$$b_n = (0,65 \div 0,75) m = 0,75 \cdot 3,75 = 2,8.$$

3.3 Вибираємо напрямок обертання обмотки якоря і визначаємо напрямок ЕРС у секціях обмотки.

3.4. Визначаємо полярність щіток.

3.5. Виділяємо короткозамкнені секції.

4. Складаємо електричну схему обмотки (мал. 19.29).



Мал. 19.29 Електрична схема обмотки, що зображена на мал. 19.28

З мал. 19.29 видно, що обмотка складається з двох паралельних гілок ($2a = 2$). Зазначена залежність є характерною для простої хвильової обмотки, в якій число паралельних гілок не залежить від числа полюсів і завжди дорівнює двом.

З приведених схем простої хвильової обмотки видно, що секції кожної паралельної гілки рівномірно розподілені під усіма полюсами машини. Слід також зазначити, що в такій обмотці можна було б обмежитися застосуванням тільки двох щіток, наприклад A_1 і B_1 . Однак у цьому випадку порушилася б симетрія обмотки, тому що число секцій в паралельних гілках стає неоднаковим: в одній гілці вісім секцій, а в іншій сім. Тому в машині як правило встановлюють стільки щіток,

скільки головних полюсів, тим більше, що це дозволяє зменшити величину струму, що приходиться на кожную щітку, і зменшити розміри колектора.

Хвильові обмотки застосовують у високовольтних машинах.

Складна хвильова обмотка. У цій обмотці також можна виділити m простих обмоток, що замикаються по своїх пазах і своїх колекторних пластинах.

Особливістю складної хвильової обмотки є те, що після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, що розташована ліворуч чи праворуч від вихідної на відстані m .

Результуючий крок цієї обмотки визначається виразом:

$$Z_e \pm m$$

$$y = (Z_e \pm m)/p \quad \text{елементарних пазів} \quad (19.5)$$

Перший частковий крок:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon \quad \text{елементарних пазів}$$

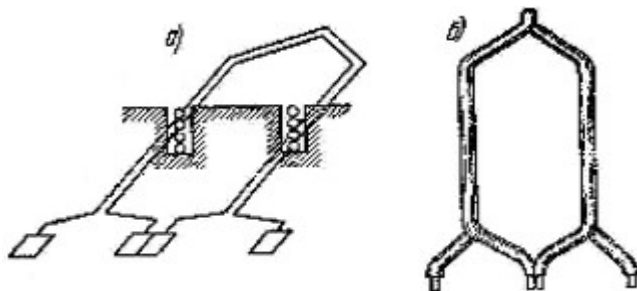
Другий частковий крок:

$$y_2 = y - y_1 \quad [\text{елементарних пазів}].$$

Число паралельних гілок цієї обмотки $2a = 2m$, тобто в m раз більше, ніж у простої обмотки.

Для виконання обмотки симетричною необхідно, щоб $2p/m$ дорівнювало цілому числу. Ці обмотки застосовуються в машинах великої потужності.

Комбінована обмотка. Комбінована (жаб'яча) обмотка являє собою поєднання петльової і хвильовий обмоток, розташованих в одних пазах і приєднаних до загального колектора. Секція цієї обмотки показана на мал. 19.30.

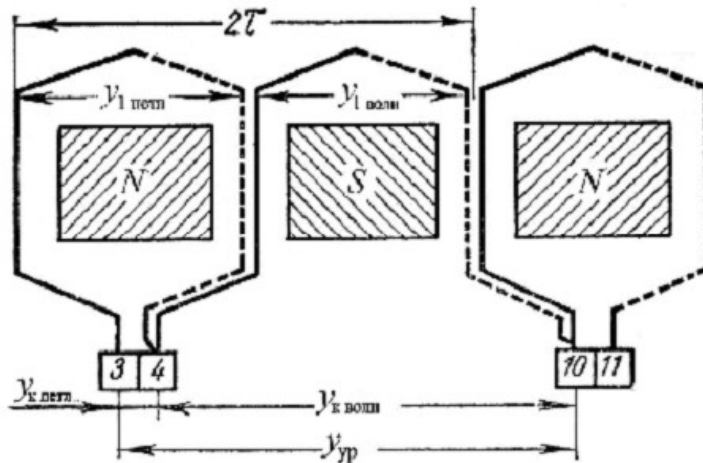


Мал. 19.30. Секція комбінованої обмотки: а - розташування в пазах; б - окрема секція

Оскільки кожна з простих обмоток двохшарова, то комбінована обмотка укладається в чотири шари, а до кожної пластини колектора припаюється чотири провідники.

Комбінована обмотка застосовується в потужних електричних машинах. Її основна перевага полягає в тому, що вона не вимагає вирівнювальних з'єднань.

На мал. 19.31 показана принципова схема комбінованої обмотки.



Мал. 19.31. Схема комбінованої обмотки.

Кроки по якорю обмоток, що складають комбіновану, роблять однаковими.

$$y_{1\text{нетл}} = y_{1\text{хв}}$$

Крок комбінованої обмотки дорівнює сумі кроків простих обмоток

$$y_{1\text{нетл}} + y_{1\text{хв}} = \frac{Z_e}{2p} + \frac{Z_e}{2p} \quad (19.6)$$

Тому що $Z_e = K$, та $y_{1\text{нетл}} + y_{1\text{хв}} = \frac{K}{p} = y_{зб}$ то крок обмотки по якорю дорівнює потенційному кроку.

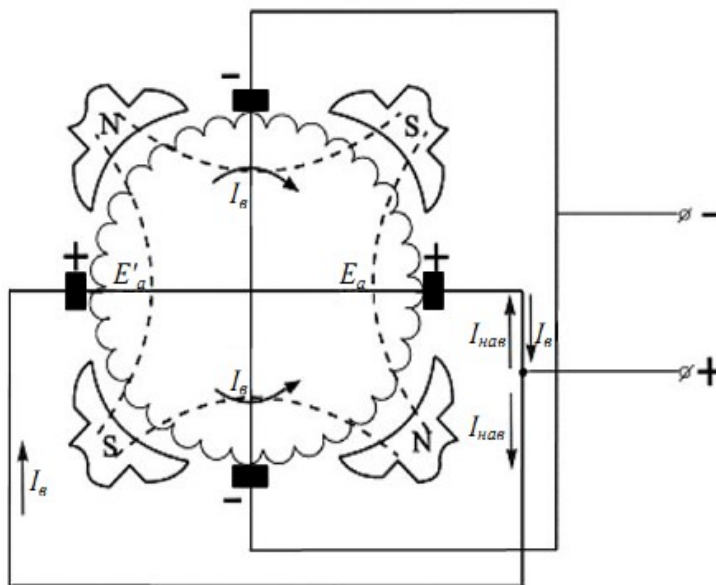
Отже, ті колекторні пластини, що повинні бути з'єднані зрівнювачами, у комбінованій обмотці з'єднуються секціями, а тому вирівнювальні з'єднання не застосовуються.

Вирівнювальні з'єднання в обмотках якорів. В обмотках якорів машин постійного струму виконують вирівнювальні з'єднання, які поділяють на вирівнювачі *першого* і *другого* роду.

Вирівнювачі першого роду. Необхідність установки цих вирівнювальних з'єднань пояснюється такими причинами. При зборці машини постійного струму повітряний зазор між якорем і головними полюсами для однієї пари полюсів, може

бути іншим, ніж для іншої пари полюсів. З цієї причини магнітний опір на шляху проходження магнітних силових ліній поля збудження може бути різним для різних пар полюсів. В результаті цього магнітні потоки головних полюсів в машині можуть відрізнятися за значенням. Тому ЕРС, індукована цими потоками в паралельних гілках може бути неоднакова за значенням. У цьому випадку між паралельними гілками починають протікати вирівнювальні струми від паралельних гілок з великим значенням ЕРС до паралельних гілок з меншим значенням ЕРС.

Шлях, по якому протікає вирівнювальний струм, схематично зображений на мал. 19.32.



Мал. 19.32. Вирівнювальні струми в паралельних гілках простої петльової обмотки при магнітній несиметрії

Нехай $E'_a > E_a$. Зі схеми випливає, що вирівнювальний струм тече по шляху, що проходить через колектор і щітки.

Отже, крім навантажувального струму він додатково завантажує щітковий апарат машини, погіршуючи умови струмознімання на колекторі. З цієї причини підсилюється іскріння під щітками, що скорочує термін служби машини.

З тією метою, щоб змінити шлях вирівнювального струму, тобто, щоб він протікав, минаючи колектор і щітки, виконують *вирівнювальні з'єднання першого роду*. Ці вирівнювачі з'єднують теоретично точки рівного потенціалу, що належать сусіднім паралельним гілкам.

Ці точки знаходяться на відстані $y_e = S/a = K/a = Z_e/a$ - крок вирівнювача. Схематично вирівнювальні з'єднання першого роду представлені на мал. 19.33.

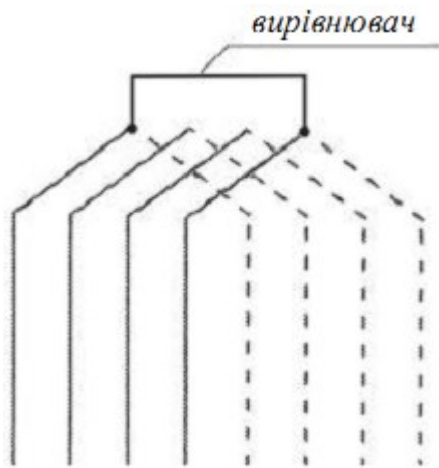


Рис. 19.33. Вирівнювальні з'єднання першого роду

Повне число вирівнювачів першого роду дорівнює K/p . Однак, як правило, не виконують повне число вирівнювачів, а виконують від $1/6$ до $1/2$ повного числа.

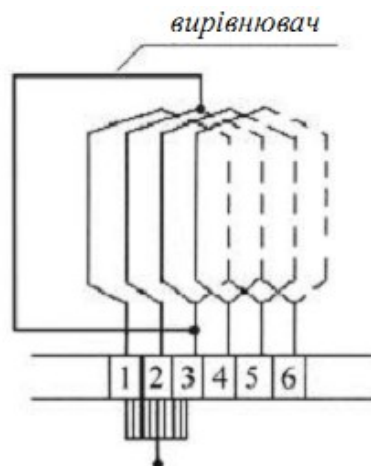
Конструктивно вирівнювачі виконують проводом, перетин якого не більший 50% перетину секцій.

Ці вирівнювачі можуть бути встановлені з боку колектора, з'єднуючи рівнопотенційні колекторні пластини, чи з боку, протилежному колектору, як це показано на приведеній вище схемі.

Вирівнювачі другого роду. Ці вирівнювачі встановлюються в складних обмотках якорів, тобто в складних петльових і хвильових обмотках.

Необхідність установки таких вирівнювачів пояснюється у такий спосіб. В складних петльових і хвильових обмотках прості обмотки, що утворюють складну, з'єднані паралельно через щітковий контакт. Але забезпечити однаковий контакт щіток із усіма простими обмотками практично неможливо, тому струм між простими обмотками розподіляється неоднаково, що порушує рівномірний розподіл потенціалу по колектору і може викликати на ньому іскріння. Для усунення цього небажаного явища застосовують **вирівнювальні з'єднання другого роду**, за допомогою яких прості обмотки, що входять в складну, електрично з'єднують між собою в точках рівного потенціалу. Таким чином, якщо вирівнювачі першого роду усувають небажані наслідки магнітної несиметрії, то вирівнювачі другого роду усувають нерівномірність розподілу потенціалу по колектору при складних обмотках якоря.

На розгорнутій схемі обмотки вирівнювачі другого роду представлені на мал. 19.34.



Мал. 19.34. Вирівнювальні з'єднання другого роду

З приведеної схеми випливає, що вирівнювачі другого роду з'єднують рівнопотенційні точки, розташовані на протилежних сторонах якоря. Отже, для конструктивного виконання таких вирівнювачів необхідно передбачити канали в корпусі якоря в осьовому напрямку.

Таким чином, установка вирівнювачів другого роду поліпшує умову струмоznімання на колекторі в складних обмотках якорів.

Розглядаючи область застосування вирівнювачів першого і другого роду в обмотках якорів необхідно відзначити наступне:

1. Прості петльові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів першого роду.
2. Складні петльові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів першого і другого роду.
3. Прості хвильові обмотки якорів не вимагають установки вирівнювачів.
4. Складні хвильові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів другого роду.
5. Комбіновані обмотки не вимагають установки вирівнювачів.

4. Електрорушійна сила обмотки якоря та електромагнітний момент

Значення ЕРС, що індукується в провіднику обмотки якоря, визначається виразом (19.1)

$$e = Blv.$$

Магнітна індукція B у повітряному зазорі між полюсними наконечниками і поверхнею якоря має неоднакові значення. Як правило в машинах постійного

струму її розподіл по поверхні якоря визначається кривою $ABCD$, форма якої близька до трапеції (мал. 19.35). Площа, обмежена цією кривою і віссю абсцис, пропорційна магнітному потоку в повітряному зазорі під одним полюсом. Оскільки значення індукції B у межах полюсного поділу τ різні, то для визначення ЕРС зручно скористатися середнім значенням магнітної індукції, прийнявши його рівним висоті прямокутника $AB'C'D$ з основою τ , площа якого дорівнює площі фігури $ABCD$. Тоді середнє значення ЕРС, що індукується в одному провіднику, покладеному на поверхні якоря, дорівнює:

$$E_{cp} = B_{cp}lv.$$

Обмотка якоря складається з N провідників, однак ЕРС обмотки визначається величиною ЕРС лише однієї паралельної гілки, що містить $N/2a$ послідовно з'єднаних провідників.

Тому ЕРС обмотки якоря

$$E_a = E_{cp} \frac{N}{2a} = B_{cp}lv \frac{N}{2a},$$

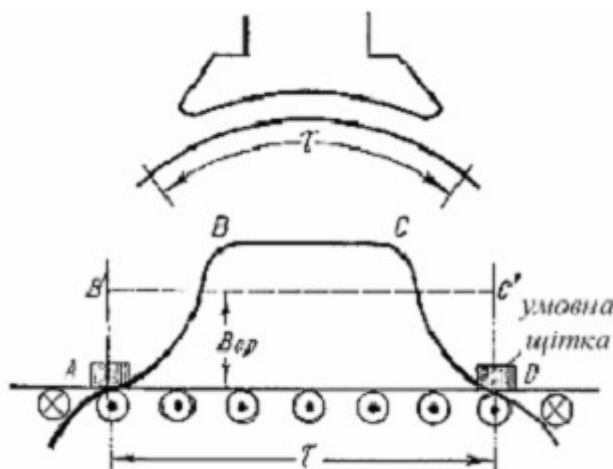


Рис. 19.35. Розподіл магнітної індукції в зазорі машини постійного струму де v - окружна швидкість обертового якоря, м/с;

$$v = \pi Dn/60,$$

l - довжина якоря, м; n - швидкість обертання якоря, об/хв; D - діаметр якоря, м.

Довжину окружності якоря πD можна виразити у такий спосіб:

$$\pi D = \tau 2 p$$

тоді

$$v = \tau 2pn/60.$$

Підставивши цей вираз в (19.7), одержимо:

$$E_a = B_{cp} l \frac{\tau 2pn}{60} \cdot \frac{N}{2a}.$$

Добуток $l\tau$ є площа, що пронизує магнітний потік одного полюса (мал. 19.36), тому

$$B_{cp} l \tau = \Phi,$$

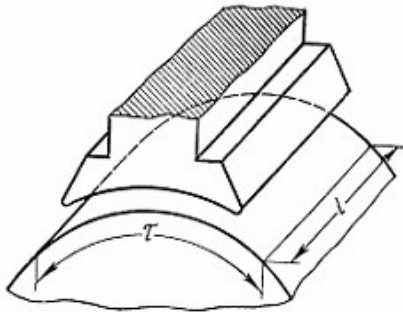
де Φ - магнітний потік у повітряному зазорі під одним полюсом.

Отже, ЕРС обмотки якоря

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n.$$

Величина $c_e = pN/(60a)$ для даної машини є постійною, тому остаточно:

$$E_a = c_e \Phi n.$$



Мал. 19.36. До висновку формули ЕРС обмотки якоря

Тут ЕРС E_a виражена у вольтах, а магнітний потік Φ - у веберах (Вб).

Значення ЕРС обмотки якоря залежить від ширини секції y_l . Найбільше значення ЕРС відповідає повному (діаметральному) кроку ($y_l = \tau$), тому що в цьому випадку з кожною секцією обмотки зчіплюється весь основний магнітний потік Φ . Якщо ж секція укорочена ($y_l < \tau$), то кожна секція зчіплюється лише з частиною основного потоку, а тому ЕРС обмотки якоря зменшується. Такий же ефект при подовженому кроці секцій ($y_l > \tau$), тому що в цьому випадку кожна секція обмотки зчіплюється з основним потоком однієї пари полюсів і частково з потоком сусідньої пари, що має протилежний напрямок, так що результуючий потік, зчеплений з кожною секцією, стає меншим потоку однієї пари полюсів. З цієї причини в машинах постійного струму практичне застосування одержали секції з повним або укороченим кроком.

На ЕРС машини впливає положення щіток: при перебуванні щіток на геометричній нейтралі ЕРС найбільша, тому що в цьому випадку в кожній паралельній гілці обмотки всі секції мають однаковий напрямок ЕРС; якщо ж щітки

змістити з нейтралі, то в паралельних гілках виявляться секції з протилежним напрямком ЕРС, в результаті ЕРС обмотки якоря буде зменшена.

При досить великому числі колекторних пластин зменшення ЕРС машини при зрушенні щіток з нейтралі враховується множником $\cos\beta$:

$$E_a = c_e \Phi n \cos\beta \quad (19.11)$$

де β - кут зсуву осі щіток відносно нейтралі.

Електромагнітний момент. При проходженні по пазових провідниках обмотки якоря струму $i_a = I_a/(2a)$, він взаємодіє з основним магнітним полем машини і на кожний провідник обмотки діє електромагнітна сила (мал. 19.37)

$$F_{ем} = B_{cp} l i_a,$$

де B_{cp} - середнє значення магнітної індукції в зазорі; l - довжина якоря.

Напрямок цих сил визначають за правилом лівої руки. Сукупність електромагнітних сил створює електромагнітний момент.

Величину електромагнітного моменту $M_{ем}$ можна представити виразом:

$$M_{ем} = F_{ем} \frac{D}{2} N = B_{cp} l i_a \frac{D}{2} N,$$

де N - кількість активних провідників в обмотці якоря.

Враховуючи, що $i_a = I_a/2a$, $\pi D = 2p\tau$, а корисний магнітний потік збудження $\Phi = B_{cp} l \tau$ (мал. 19.35), одержимо

$$M_{ем} = B_{cp} l \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{2p\tau}{2\pi} N = \frac{pN}{2\pi a} \cdot \Phi I_a,$$

або

$$M_{ем} = C_m \Phi I_a,$$

де $C_m = pN/2\pi a$ - величина, постійна для даної машини.

Потік Φ виражається у веберах (Вб), а момент $M_{ем}$ - у ньютонно-метрах (Н·м).

Контрольні запитання:

1. Яке призначення колектора в генераторі і двигуні?
2. Чому станину машини роблять зі сталі?
3. У чому принципова відмінність обмоток якоря від обмоток статора безколекторних машин змінного струму?

4. Якими параметрами характеризується обмотка якоря?
5. Скільки паралельних віток має обмотка якоря шестиполюсної машини у випадках простої петльової і простої хвильової обмоток.
6. У скільки разів зміниться ЕРС обмотки якоря шестиполюсної машини, якщо просту хвильову обмотку замінити простою петльовою при тому ж числі секцій?
7. В яких обмотках якоря застосовують вирівнювачі першого і другого роду?
8. Які переваги комбінованої обмотки?
9. Як впливають ширина секції і положення щіток на ЕРС машини?
10. Якими міркуваннями керуються при виборі типу обмотки якоря?