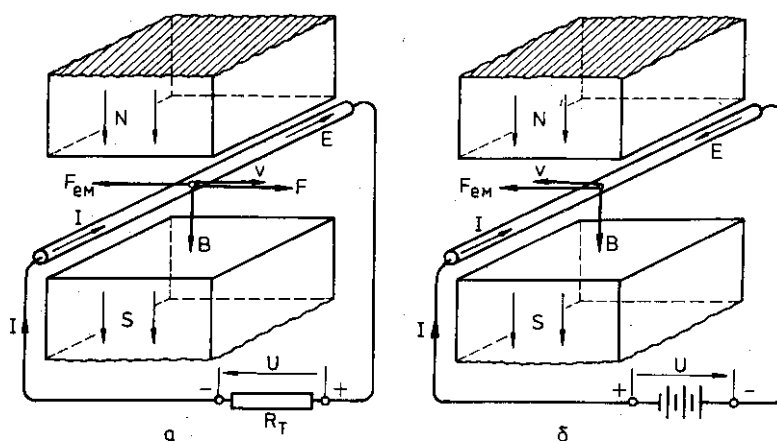


Общи въпроси на електрическите машини

6.1. Общи сведения за електрическите машини

Определение. По определение машина се нарича такъв енергопреобразуващ механизъм, при който се извършва преместване на частите му една спрямо друга. Машини, в които преобразуването на енергията се извършва вследствие на процеса **електромагнитна индукция**, се наричат електрическа машини.



Фиг. 6.1. Елементарна електрическа машина
а- генератор; б - двигател

Явлението електромагнитна индукция възниква при **изменение на магнитния поток**, обхванат от намотките на машината, и се изразява в индуктирането на е. д. н. в тях. Това изменение може да стане или вследствие на пространственото преместване на намотката спрямо магнитното поле, или при взаимно неподвижни в пространството поток и намотка вследствие на изменението във времето на обхванатия от намотката поток, или вследствие на едновременното преместване на намотката спрямо потока и промяната във времето на обхванатия от намотката магнитен поток.

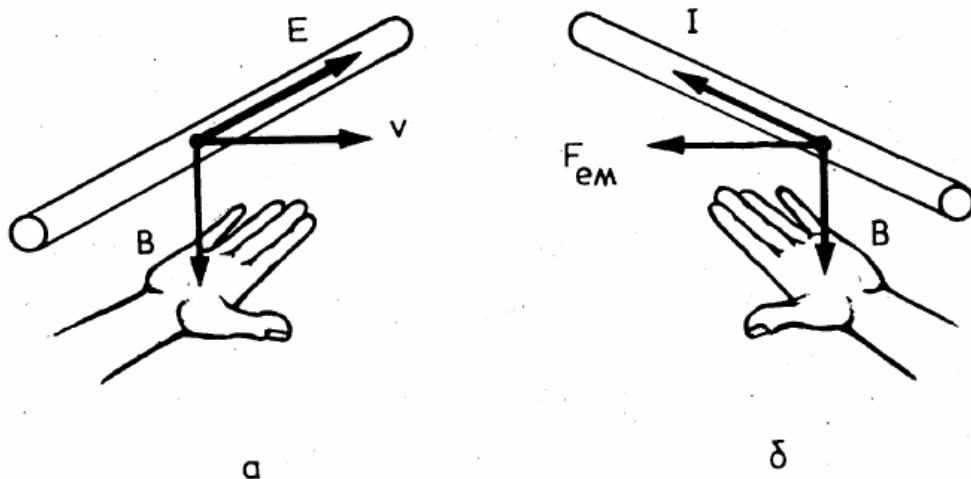
Преобразуване на енергията. Процесът на преобразуването на енергията в електрическите машини може да се изясни с елементарния модел, показан на фиг. 6.1.

Нека **външна сила F** действа върху праволинеен проводник, поставен в магнитно поле с **индукция B** , и премества този проводник перпендикулярно на магнитните линии със скорост v (фиг. 6.1 а). Тогава

съгласно закона за електромагнитната индукция в проводника се индуцира е. д. н.

$$E = Blv,$$

където l е активната дължина на проводника, т. е. тази негова част, която пресича магнитните линии.



Фиг. 6.2. Правило на дясната (а) и на лявата (б) ръка

Посоката на E се определя с правилото на *дясната ръка* (фиг. 6.2 а). Ако към краищата на проводника се включи външно товарно съпротивление R_T , през проводника и образувания затворен контур ще премине ток I , съпосочен с E .

От друга страна, от взаимодействието на тока в проводника и магнитното поле се създава електромагнитна сила, която съгласно закона на Лаплас има големина

$$(6.2) \quad F_{em} = BlI,$$

а посоката ѝ се определя с правилото на *лявата ръка* (фиг. 6.2 б). Електромагнитната сила F_{em} е противопосочна на движещата сила F , т. е. действа Спирачно. При равномерно движение

$$(6.3) \quad F = F_{em}.$$

След умножаване на двете страни на (6.3) с v , като се вземат предвид (6.1) и (6.2), се получава :

$$(6.4) \quad Fv = F_{em}v = BlIv = EI,$$

т. е. подадената **механична мощност** Fv е равна на получената (произведената) **електрическа мощност** EI . В случая механичната енергия се преобразува в електрическа и елементарната машина работи като **генератор**. Уравнението на напреженията има вид

$$(6.5) \quad E = U + IR, \quad \text{където}$$

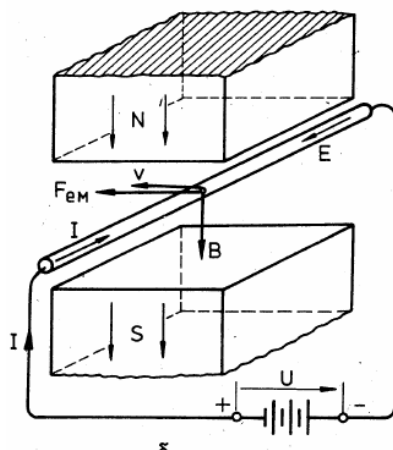
U е напрежението на изводите на външното съпротивление R_T ; IR — падът на напрежение в проводника със съпротивление R .

Умножавайки (6.5) с I , се получава

$$(6.6) \quad EI = UI + I^2R,$$

т. е. произведената от генератора електрическа мощност EI е равна на сумата от мощността, отдавана във външната верига UI , и електрическите загуби в проводника I^2R .

Дадената машина може да работи и като двигател, ако проводникът се включи към източника с напрежение U (фиг. 6.1 б). От взаимодействието на тока в проводника I и магнитното поле се създава електромагнитна сила **F_{em}** , големината и посоката на която се определят както при генераторен режим. Под действие на F_{em} проводникът ще се премества наляво с определена скорост v .



При това в проводника ще се индуктира е. д. н. E , чиято големина и посока се определят както при генератора. Сега е. д. н. E е противопосочно на тока I . Уравнението на напреженията е

$$(6.7) \quad U = E + IR.$$

След умножаване на (6.7) с I се получава

$$(6.8) \quad UI = EI + I^2R = F_{em}v = I^2R.$$

В това уравнение EI е частта от подадената електрическа мощност UI , равна на получената механична мощност $F_{em}v$. По такъв начин става преобразуване на **електрическата енергия в механична**, т. е. елементарната машина работи като **двигател**.

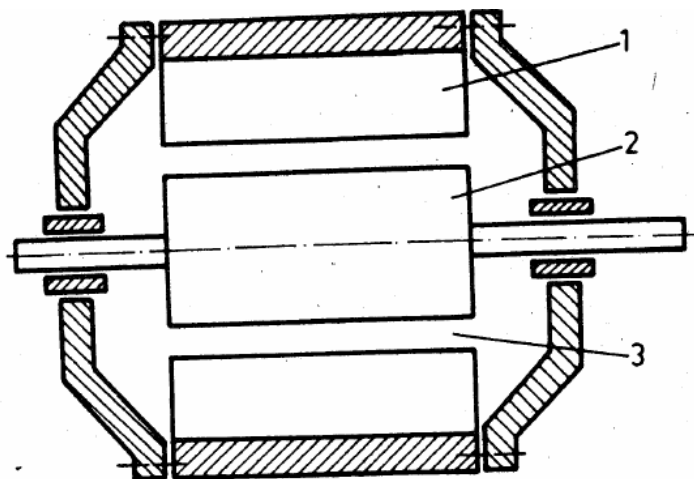
Направените разглеждания дават възможност да се направят следните **изводи**:

- 1) за всяка електрическа машина е задължително наличието на **проводяща среда (проводници) и магнитно поле** с възможност за взаимно преместване;
- 2) както при генераторен, така и при двигателен режим едновременно се **наблюдава индуктиране на е. д. н. в проводника и възникване на електромагнитна сила**, която действа върху него;

3) всяка електрическа машина може да работи **както като генератор**, така и **като двигател**, т. е. електрическите машини имат свойството **обратимост**.

Принципна конструктивна схема.

Разнообразието на електрическите машини е твърде голямо. Независимо от това електрическата машина може да бъде представена с принципната конструктивна схема, показана на фиг. 6.3.



Фиг. 6.3. Принципна конструктивна схема на електрическа машина

Електрическата машина се състои от две основни неподвижен с т а т о р 1 и въртящ се цилиндричен р о т о р 2, разделени с въздушната междина 3. Едната от посочените части на машината е снабдена с елементи, възбуждащи магнитното поле (например електромагнит или постоянен магнит), а другата част има намотка, в която се индутира е. д. н.

Както статорът, така и роторът имат магнитопроводи, изработени от магнитно мек материал. Прието е тази част на машината, която възбужда магнитното поле, да се нарича **индуктор**, а частта, в която се индутира полезното е. д. н. — **к о т в а**.

Класификация. Според вида на тока електрическите машини са **постоянното кови и променливотокови**. Променливотоковите машини са **асинхронни, синхронни и колекторни**.

Според предназначението си електрическите машини се разделят на:

- 1) генератори, които преобразуват механична енергий в електрическа;
- 2) двигатели — преобразуват електрическа енергия в механична;

3) преобразуватели - преобразуват електрическа енергия също в електрическа, но с други параметри.

За всички електрически машини важи принципът на **о б р а т и м о с т т а**, т. е. една машина може да работи както като **генератор**, така и като **двигател** или преобразувател, при който може да се променя посоката на преобразуване на енергията.

Според мощността електрическите машини може условно да се разделят на следните групи:

до 0,5 kW — микромашини,

0,5— 20 kW — машини с малка мощност,

20—250 kW — машини със средна мощност,

над 250 kW — машини с голяма мощност.

Номинални данни. Представяват съвкупност от числени стойности на електрически и механични параметри, дадени от производителя и показани на табелката на електрическата машина. Към тях се **отнасят номиналните мощност, напрежение, ток, честота на въртене** и др., а за променливотоковите машини също номиналната честота и номиналният коефициент на мощността $\cos\varphi$.

При двигателя **номиналната мощност** е мощността на неговия вал, а при генератора — отдаваната електрическа мощност.

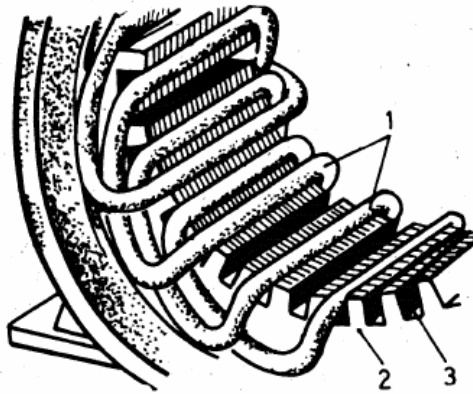
Области на приложение. Електрическите машини се използват главно за **генериране** на електрическа енергия и за нейното преобразуване в механична енергия. За производство на електрическа енергия почти изключително се използват **синхронни генератори**, които произвеждат променливотокова енергия с промишлена честота, която у нас е 50 Hz.

Най-разнообразни по мощност, честота на въртене и конструкция **електрически двигатели** се използват широко в промишлеността, селското стопанство, транспорта и бита.

Намотки на променливотоковите машини

Основни термини и определения

а. Намотка на променливотокова машина наричаме система от изолирани проводници, поставени в каналите на статора и свързани по подходящ начин помежду си (фиг. 6.4).



Фиг. 6.4. Разположение на намотката в каналите на статорния пакет

1 — намотка; 2 — статорен пакет;
3 — статорен канал

б. **Канално деление** — разстоянието между осите на два съседни канала:

$$(6.9) \quad t_k = \frac{\pi D}{Z},$$

където

D е вътрешният диаметър на статора;

Z — броят на статорните канали.

Полюсно деление — дължина дъгата от вътрешната статорна окръжност, съответствуваща на един полюс:

$$(6.10) \quad \tau = \frac{\pi D}{2p},$$

където $2p$ е броят на полюсите. В (6.10) полюсното деление τ е изразено в единици за дължина. При разглеждане на намотките полюсното деление се изразява в канални деления:

$$(6.11) \quad \tau = \frac{Z}{2p}.$$

г. **Брой на каналите за полюс и фаза**. Както следва от наименованието, тази величина се определя от израза

$$(6.12) \quad q = \frac{Z}{2pt},$$

където t е броят на фазите.

д. **Геометрични и електрически градуси**. За удобство в теорията на електрическите машини ъглите се изразяват в електрически градуси

(ел. °) или в електрически радиани (ел. rad), при което се взема предвид, че едно полюсно деление τ съответствува на 180 ел. ° или на π ел. rad. Тъй като, от друга страна, полюското деление τ съответствува на $\frac{180^\circ}{p}$ геометрични градуси или на геометрични радиани, то

$$(6.13) \quad \frac{\pi}{p} \gamma_{\text{ел}} = p \gamma_{\text{геом}},$$

Където

$\gamma_{\text{геом}}$ е ъгълът, изразен в градуси или радиани,
 $\gamma_{\text{ел}}$ — същият ъгъл, изразен в ел. ° или ел. rad;
 p — броят на двойките полюси.

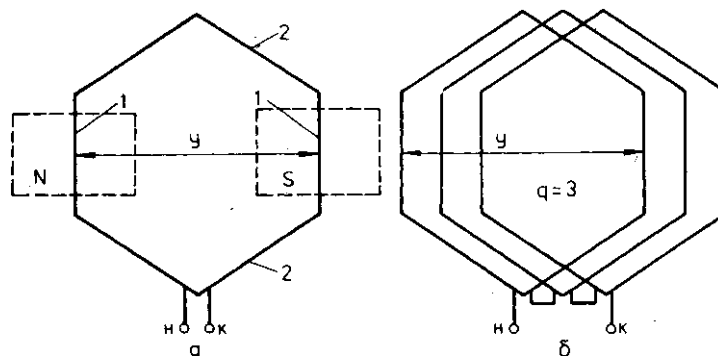
При липса на специална уговорка ще се приеме, че ъглите са изразени в електрически единици.

Например ъгълът между два съседни канала в ел. ° е

$$(6.14) \quad \alpha = \frac{360}{Z} p.$$

Елементи на намотката

a. Навивка — най-простият елемент на намотката, който се състои от два активни проводника, разположени под два съседни *разноименни* полюса и свързани помежду си с челни съединения.



Фиг. 6.5. Секция (а) и секционна група (б)

1 — активни страни; 2 — челни съединения

б. Секция — основен елемент на намотката, който се състои от една или няколко последователно свързани навивки, страните на които лежат в едни и същи канали (фиг. 6.5 а). Тя има активни страни и челни съединения. Широчината на секцията y се нарича *стъпка* на намотката. Измерва се в канални деления и трябва да бъде равна или приблизително равна на полюсното деление. В схемите на намотките секциите винаги се изобразяват като едно-навивкови.

в. Секционна група — група секции, чиито активни страни са разположени в съседни канали под един полюс и принадлежат на една фаза (фиг. 6.5 б). Нарича се още *полюсно-фазна група*. От даденото определение следва, че една секционна група се състои от толкова секции, колкото е **броят на каналите за полюс и фаза q** .

Класификация на намотките

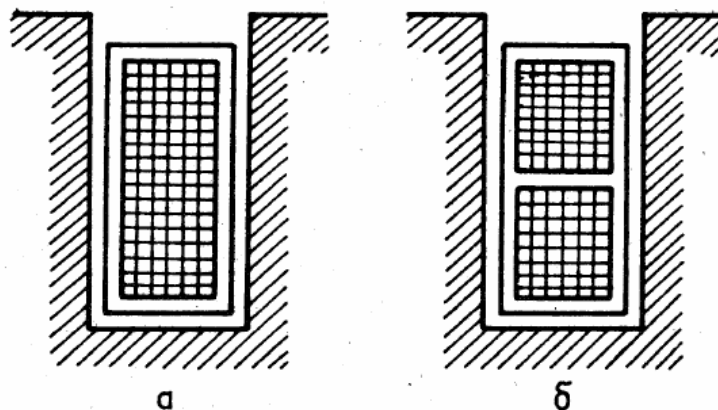
1. Според броя на фазите m намотките са еднофазни и многофазни (най-често двуфазни и трифазни).

2. Според стъпката на намотката y :

- 1) с диаметрална стъпка ($y = \tau$);
- 2) със скъсена стъпка ($y < \tau$);
- 3) с удължена стъпка ($y > \tau$).

Обикновено намотките се изпълняват с диаметрална или със скъсена стъпка.

3. Според броя на секционните страни в канал са еднослойни (фиг. 6.6 а) и двуслойни (фиг. 6.6 б).



Фиг. 6.6. Еднослойна (а) и двуслойна (б) намотка

4. Според броя на каналите за полюс и фаза q намотките са съсредоточени ($q=1$) и разпределени ($q>1$). Възможно е q да бъде цяло или дробно число. В последния случай намотките, се наричат **дробни**. Най-често намотките са разпределени, като q е цяло число.

Свързване на секционните групи и паралелни клонове

Секционните групи, принадлежащи на една фаза, се свързват помежду си и образуват намотката на дадената фаза.

Ако S е общият брой на секциите в една m -фазна намотка, броят на секционните групи във фаза ще бъде

$$(6.15) \quad L_{\phi} = \frac{S}{mq} = \frac{2pmS}{mZ} = \frac{2pS}{Z}$$

При еднослойните намотки $S = \frac{Z}{2}$ и $L_{\phi} = p$, а при двуслойните — $S = Z$ и $L_{\phi} = 2p$. Следователно, за да се образува намотката

Следователно, за да се образува намотката на една фаза, при еднослойната намотка трябва да се свържат помежду си p секционни групи, разместени на 2τ една от друга, а при двуслойната намотка — $2p$ секционни групи, разместени на едно полюсно деление τ .

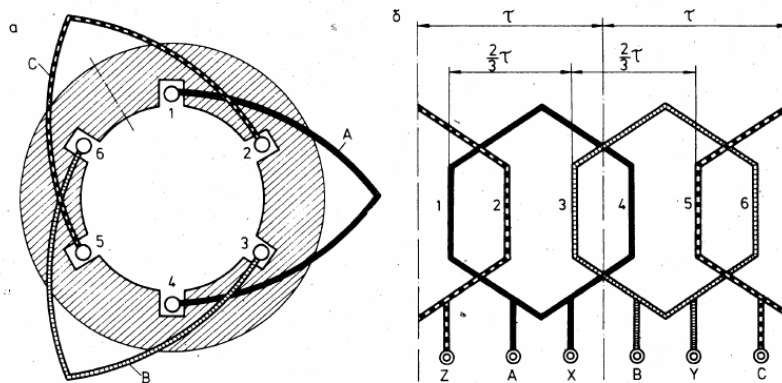
При последователно свързване на всички секционни групи, принадлежащи на една фаза, броят на паралелните клонове е а 1. Освен последователно секционните групи може да се свържат смесено или паралелно, при което

се получава друг брой на паралелните клонове. При еднослойните намотки максималният брой на паралелните клонове е $a_m = p$, а при двуслойните $a_m = 2p$.

Схеми на променливотокови намотки

За удобно и нагледно изобразяване на секциите и тяхното свързване обикновено се използват т. нар. **разгънати схеми на намотките**. В тези схеми цилиндричната повърхност на статора заедно с намотката условно се разгъва в равнина.

Най-простата трифазна еднослойна съсредоточена намотка на двуполусна машина е показана на фиг. 6.7. Тя се състои от три секции, осите на които са пространствено разместени на 120 ел.° , т. е. на $2/3\tau$



Фиг. 6.7. Най-проста трифазна намотка
 а — разположение на фазните намотки в каналите на статорния пакет; б — разгънатата схема на намотката

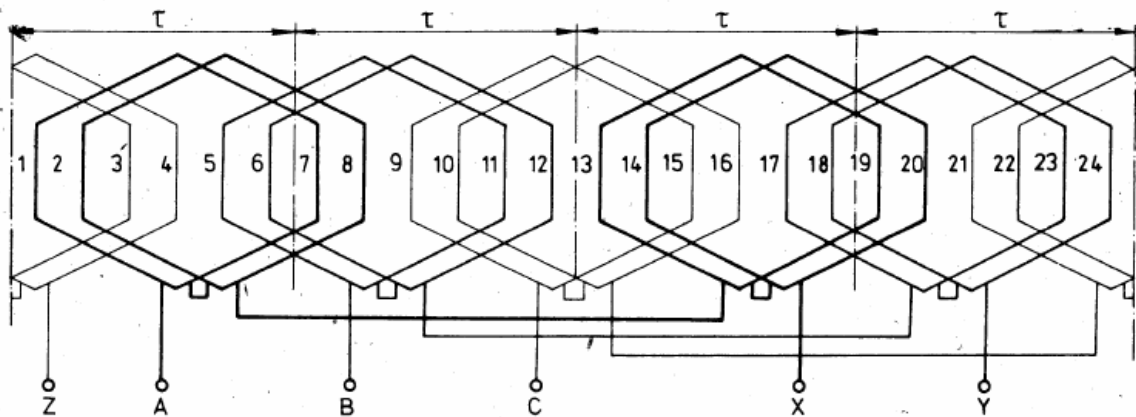
Тук всяка секция представлява фазна намотка.

При съставянето на схемите на намотките са известни броят на фазите m , броят на каналите Z и броят на полюсите $2p$. Изчисляват се:

- полюсното деление $\tau = \frac{Z}{2p}$;
- броят на каналите за полюс и фаза $q = \frac{Z}{2pm}$;
- ъгълът между два съседни канала $\alpha = \frac{360}{Z} p$.

Начертването на разгънатата схема на еднослойна намотка се извършва в следната последователност:

- начертават се толкова активни страни, колкото е Z ;
- разпределят се активните страни между m -те фази, като се взема предвид, че под един полюс на една фаза принадлежат q канала;
- свързват се активните страни на една фаза, за да се образуват секциите; свързват се секциите, за да се образуват секционните групи; свързват се секционните групи, за да се получи намотката на дадена фаза;



Фиг. 6.8. Разгънатата схема на трифазна еднослойна намотка

— аналогично се начертават намотките на другите фази, като се отчита обстоятелството, че е. д. н. на m -те фази трябва да образуват симетрична m -фазна система.

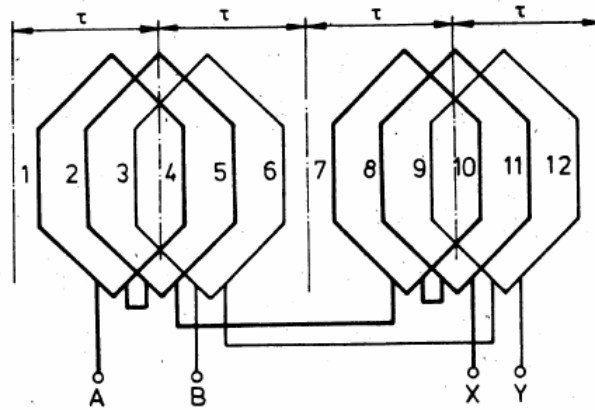
На фиг. 6.8 е показана разгънатата схема на трифазна еднослойна намотка със следните данни: $m=3$, $Z=24$, $2p=4$. Изчисляват се:

$$\tau = \frac{24}{4} = 6; \quad q = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2; \quad \alpha = \frac{360^\circ}{24} \cdot 2 = 30^\circ.$$

Началото A на първата фаза е в 1-ви канал. Тъй като $\alpha=30^\circ$, началото B на втората фаза е отместено на 4 канални деления ($4 \cdot 30=120^\circ$), т. е. в 5-и канал, а началото C на третата фаза е в $5+4=9$ -и канал.

На фиг. 6.9 е дадена разгънатата схема на двуфазна еднослойна намотка със следните данни: $m=2$, $Z=16$, $2p=4$.

слойна намотка със следните данни: $m=2$, $Z=16$, $2p=4$. Изчисляват се: $\tau = \frac{16}{4} = 4$; $q = \frac{16}{4 \cdot 2} = 2$; $\alpha = \frac{360^\circ}{16} \cdot 2 = 45^\circ$. Началото на фаза A е в 1-ви канал. Началото на фаза B е отместено на две канални деления ($2 \cdot 45=90^\circ$), т. е. в $1+2=3$ -ти канал.

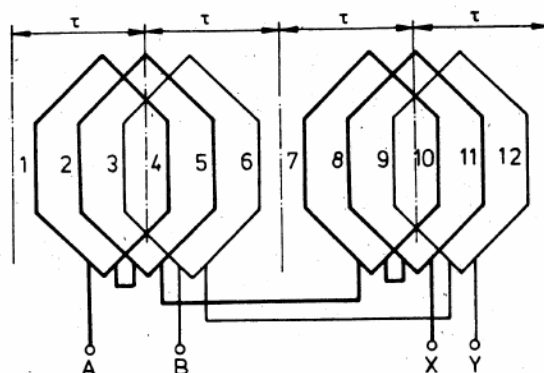


Фиг. 6.10. Разгънатата схема на еднослой-
на намотка за еднофазна машина

Началото на фаза А 1-ви канал. Началото на фаза В е отместено на две канални деления ($2 \cdot 45 = 90^\circ$), т.е. в $1+2=3$ -ти канал.

На фиг. 6.10 е показана схемата на еднослойна намотка за еднофазна машина с $2p=4$, $Z=12$. При еднофазните машини е характерно, че освен работната намотка А—Х се поставя и пускова намотка В—У.

кова намотка В—У. Работната намотка заема $\frac{2}{3}$ от общия брой канали ($Z_A = \frac{2}{3} \cdot 12 = 8$), а пусковата — $\frac{1}{3}$ от общия брой канали ($Z_B = \frac{1}{3} \cdot 12 = 4$). За двете намотки броят на каналите за



Фиг. 6.10. Разгънатата схема на еднослой-
на намотка за еднофазна машина

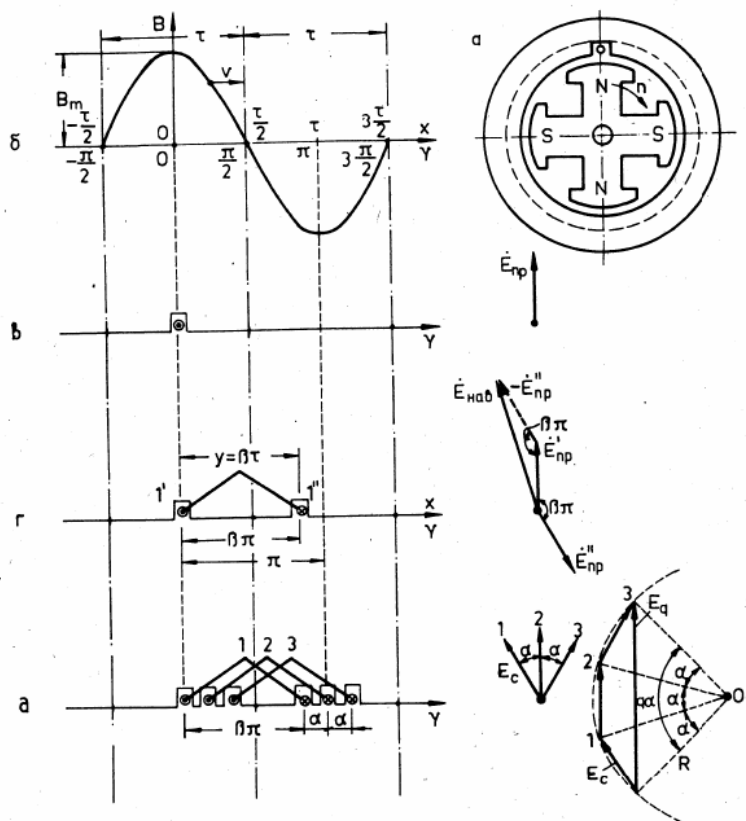
полус и фаза е различен и

в разглеждания пример е $q_A = \frac{Z_A}{2p} =$

$$= \frac{8}{4} = 2; \quad q_B = \frac{Z_B}{2p} = \frac{4}{4} = 1. \quad \text{Полусното деление е } \tau = \frac{12}{4} = 3.$$

Електродвижеви напрежения на променливотоковите намотки

Общи сведения. Във въздушната междина на многофазните променливотокови машини съществува въртящо се магнитно поле, което индуцира електро-движещо напрежение (е. д. н.) в неподвижната статорна намотка. За удобство ще представим въртящото се магнитно поле с постоянни, магнити, поставени на ротора, който се върти с постоянна честота на въртене $n, \text{ min}^{-1}$ (фиг. 6.11 а).



Фиг. 6.11. Определяне на е. д. н. на променливотокова намотка

Е. д. н. на проводник. Моментната стойност на е. д. н., индуктирано в един проводник се „определя от израза (6.1):

$$(6.16) \quad e_{np} = Blv,$$

Където

B е магнитната индукция в мястото, където се намира проводникът в дадения момент от времето;

l — активната дължина на проводника;

v — периферната скорост, с която полето се движи спрямо проводника.

Тъй като $l = \text{const}$ и $u = \text{const}$, то $e_{np} \equiv B$, т. е. e_{np} ще се изменя във времето по същия закон, по който е разпределена магнитната индукция във въздушната междина. Ще приемем, че магнитната индукция има синусоидно пространствено разпределение (фиг. 6.11 б).

Пространствената координата е x (изразена в единици за дължина) или y (изразена в ел. рад), като връзката между тях е

$$(6.17) \quad y = \frac{\pi}{\tau} x,$$

където τ е полюсното деление (уравн. 6.10).

Пространствената вълна на магнитната индукция може да се представи във вида

$$(6.18) \quad B = B_m \cos \gamma = B_m \cos \frac{\pi}{\tau} x,$$

където B_m е нейната амплитуда.

Ъгловата скорост, с която полето се върти спрямо проводника, е

$$(6.19) \quad \Omega = 2\pi n.$$

От връзката между периферната и ъгловата скорост, като се вземат предвид (6.19) и (6.10), следва

$$(6.20) \quad v = \frac{D}{2} \Omega = \pi D n = 2\tau n.$$

За време $T = 1/f$, равно на един период на е. д. н., магнитното поле изминава път, равен на 2τ , то

$$(6.21) \quad v = \frac{2\tau}{T} = 2\tau f.$$

От (6.21) и (6.22) следва, че честотата на е. д. н. Е

$$(6.22) \quad f = pn,$$

т. е. тя е пропорционална на броя на двойките полюси p и на честотата на въртене n .

При направеното допускане, че магнитната индукция има синусоидно пространствено разпределение, в проводника ще се индуктира е. д. н. (фиг. 6.11е) с моментна стойност

$$e_{\text{пр}} = e_{\text{пр}m} \cos \omega t,$$

максимална стойност

$$(6.23) \quad e_{\text{пр}m} = B_m l v$$

и ефективна стойност

$$(6.24) \quad E_{\text{пр}} = \frac{B_m l v}{\sqrt{2}}.$$

Ако $B_{\text{ср}}$ е средната стойност на магнитната индукция, магнитният поток, преминаващ през въздушната междина в рамките на едно полюсно деление, ще бъде

$$(6.25) \quad \Phi = B_{\text{ср}} \tau l = \frac{2}{\pi} B_m \tau l,$$

откъдето

$$(6.26) \quad B_m = \frac{\pi \Phi}{2 \tau l}$$

След заместване на (6.21) и (6.26) в (6.24) за ефективната стойност на е. д. н. на проводника се получава

$$(6.27) \quad E_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi f \Phi.$$

Е. д. н. на навивка и секция. Навивката се състои от два активни проводника 1' и 1'' (фиг. 56.11г). Обикновено намотката се изпълнява със скъсена стъпка, т. е. широчината на навивката y е по-малка от полюсното деление τ , при което относителната стъпка

$$(6.28) \quad \beta = \frac{y}{\tau}$$

е по-малка от единица, а $y = \beta \tau$.

Електродвижещите напрежения $\dot{E}'_{\text{пр}}$ и $\dot{E}''_{\text{пр}}$,

индуцирани в двата активни проводника, са равни по големина, но са дефазирани на ъгъл $\pi\beta$.

Е. д. н. на навивката е равна на геометричната разлика от е. д. н. на активните ѝ страни (фиг. 6.11г)

$$\dot{E}_{\text{нав}} = \dot{E}'_{\text{пр}} + (-\dot{E}''_{\text{пр}}),$$

и съгласно фиг. 6.13 г е

$$(6.29) \quad E_{\text{нав}} = 2E_{\text{пр}} \sin \beta \frac{\pi}{2} = 2E_{\text{пр}} \cdot k_y,$$

където

$$(6.30) \quad k_y = \sin \beta \frac{\pi}{2}$$

се нарича коефициент на скъсяване на намотката. При диаметрална стъпка ($\beta=1$) $k_y=1$, но при ($\beta \neq 1$) се получава $k_y < 1$, т. е. k_y отчита намалението на е. д. н. поради скъсяването на стъпката на намотката.

Като се вземат предвид (6.29) и (6.27), за ефективната стойност на е. д. н. на навивката се получава

$$(6.31) \quad E_{\text{нав}} = \sqrt{2} \pi f k_y \Phi.$$

Ако секцията има w_c навивки, е. д. н. на секция ще бъде $E_c = w_c E_{\text{нав}}$, т. е.

$$(6.32) \quad E_c = \sqrt{2} \pi f w_c k_y \Phi.$$

Е. д. н. на секционна група. Секционната група се състои от

$$q = \frac{Z}{2pt}$$

секции.

На фиг. 6.115 е показана секционна група, която има $q = 3$ секции. Е. д. н. на съседните секции са дефазирани на ъгъл

$$(6.33) \quad \alpha = \frac{2\pi}{Z} p,$$

който съответствува на разместването на секциите една спрямо друга в магнитното поле. Е. д. н. на тези секции може да се изобразят с q вектора, ъгълът между които е α .

Е. д. н. на секционната група E_q е равно на геометричната сума на е. д. н. на отделните секции.

Отношението на геометричната сума на е. д. н. на секциите в секционната група към аритметичната им сума се нарича коефициент на разпределение на намотката, който съгласно фиг. 6.11 д е

$$(6.34) \quad k_q = \frac{E_q}{qE_c} = \frac{2R \sin \frac{q\alpha}{2}}{q2R \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

При съсредоточена намотка $q=1$, $k_q=1$ а при $q>1$ се получава $k_q<1$, т. е. коефициентът k_q отчита намаляването на е. д. н. поради разпределението на намотката.

От (6.34) и (6.32) следва, че е. д. н. на секционна група е

$$(6.35) \quad E_q = q k_q E_c = \sqrt{2} \pi f \omega_c q k_y k_q \Phi.$$

Е. д. н. на една фаза. Ако се умножи е. д. н. на една секционна група с броя на последователно свързаните секционни групи във фаза N_ϕ , ще се получи е. д. н. на една фаза

$$E = \sqrt{2} \pi f \omega_c q N_\phi k_y k_q \Phi.$$

Като се вземе предвид, че

$$\omega = \omega_c q N_\phi$$

е броят на последователно свързаните навивки във фаза, и се приеме означението

$$(6.36) \quad k_w = k_y k_q,$$

окончателно се получава

$$(6.37) \quad \boxed{E = \sqrt{2} \pi f \omega k_w \Phi = 4,44 f \omega k_w \Phi}.$$

Тук k_w се нарича **ко е ф и ц и е н т н а н а м о т к а т а**, който отчита намалението на е. д. н. поради скъсяването и разпределението на намотката.

Висши хармоници на е. д. н. Беше прието, че магнитната индукция във въздушната междина има синусоидно пространствено разпределение. Поради това индукираното в намотката е. д. н. е синусоидна функция на времето.

В действителност пространствената крива на магнитната индукция се отличава повече или по-малко от синусоидната. В този случай кривата на магнитната индукция може да се разложи в ред на Фурие, чиито членове са с нечетни поредни номера $v=1, 3, 5$ и т. н. Хармоникът с пореден номер

се нарича основен, а останалите — висши пространствени хармоници на магнитното поле.

Всеки пространствен хармоник на полето ще индуцира в намотката съответен времеви хармоник на е. д. н. Следователно в общ случай е. д. н. на намотката съдържа освен основния хармоник още и висши времеви хармоници.

Полученият израз (6.37) дава ефективната стойност E на основния хармоник на е. д. н., а (6.30), (6.34) и (6.36) определят стойностите на коефициентите на скъсяване k_y , на разпределение k_q и на намотката k_w за основния хармоник.

Аналитичните изрази за е. д. н. E_v индуцирано от v -тия хармоник на полето, коефициентът на скъсяване k_{yv} на разпределение k_{qv} и на намотката k_{wv} за v -тия хармоник, се извеждат по аналогичен на изложения вече начин и имат вида:

$$(6.38) \quad E_v = \sqrt{2} \pi f_v \omega k_{wv} \Phi_v ;$$

$$(6.39) \quad k_{yv} = \sin v\beta \frac{\pi}{2} ;$$

$$(6.40) \quad k_{qv} = \frac{\sin \frac{vq\alpha}{2}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} ;$$

$$(6.41) \quad k_{wv} = k_{yv} \cdot k_{qv} .$$

Ако се избере намотка с подходящо скъсяване и разпределение, при едно незначително намаление на коефициента на намотката за основния хармоник се получава чувствително намаление на коефициента на намотката за висшите хармоници. По този начин значително се намаляват висшите хармоници на е. д. н. и може да се смята, че индуцираното в намотката е. д. н. е с практически синусоидна форма.

По-нататък се взема предвид само основният хармоник на е. д. н.