

Цветозар Петков

**ЛЕКЦИОНЕН КУРС
ПО ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ – II ЧАСТ**

ГАБРОВО, 2021

Записките са предназначени за студенти от специалност „Електроенергетика и електрообзавеждане” от факултет „Електротехника и електроника” при ТУ- Габрово, изучаващи дисциплината „Електрически машини – II част ”.

Разглеждат се устройството, конструкцията и принципите на работа на машините за постоянен ток, синхронните машини и променливотоковите колекторни машини.

Разгледаните въпроси могат да бъдат полезни за студенти от други специалности и от други висши училища. .

© Цветозар Петков – автор, 2021

© Университетско издателство „Васил Априлов” – Габрово, 2021

ISBN 978-954-683-654-0

Въпрос 1

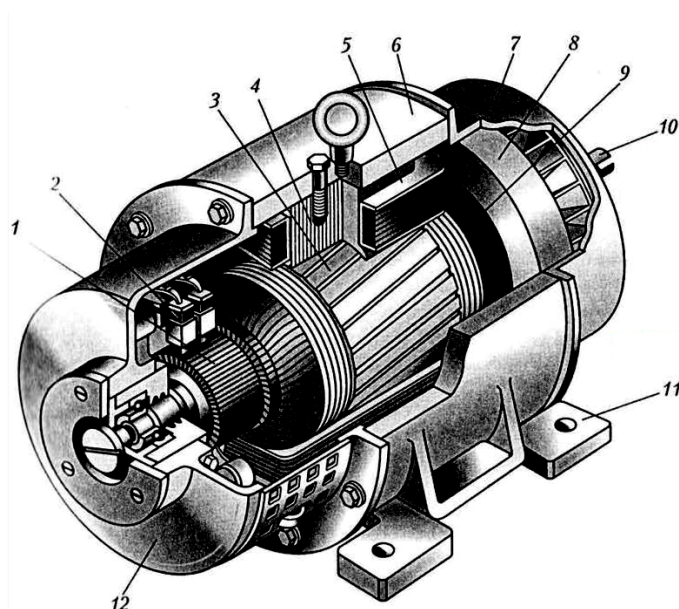
Принцип на действие на постояннотоковите машини (ПТМ). Устройство на ПТМ. Основни елементи

Постояннотоковата машина представлява електрическа машина, чиято намотка намираща се в подвижната част (котва), се свързва към захранващата мрежа за постоянен ток посредством плъзгащ се контакт, който се състои от механичен преобразувател на честота, наречен колектор и съответен четков апарат.

Наличието на колектор и плъзгащ се контакт между котвената намотка и мрежата значително усложнява устройството, и експлоатацията на машината. Предизвиква също така увеличаване на нейната себестойност. Независимо от това, тези машини поради специфичните си характеристики, които притежават, намират широко практическо приложение. Те се използват както като двигатели, така и като генератори.

1.1. Конструкция на машините за постоянен ток

В процеса на развитие на постояннотоковата машина нейната конструкция е претърпяла редица изменения. На фиг.1.1. е показана съвременна постояннотокова машина. Тя се състои от неподвижна част – статор, и въртяща се част - ротор. Статорът и роторът са отделени от въздушна междина.



1-колектор; 2-четки; 3-котвен пакет; 4-главен полюс; 5-възбудителна намотка; 6-статорно тяло;
7, 12-лагерни щитове; 8-вентилатор; 9-котвена намотка; 10-вал; 11-лапи

Фиг.1.1.

Статорът на машината представлява нейният индуктор и се състои от статорно тяло (корпус), във вътрешната страна на който е поместена намотка върху главните полюси тя се нарича възбудителна и служи за създаването на основния магнитен поток. Към статора се отнасят също така допълнителни полюси, лагерни щитове и четков апарат.

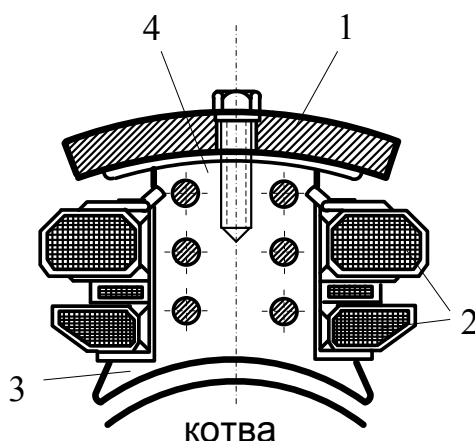
Роторът на машината се състои от вал, върху който са монтирани тялото на котвата с вложената в канали котвена намотка, колекторът и вентилаторът.

1.1.1. Статорно тяло

Статорното тяло на постояннотоковата машина служи за основен конструктивен елемент, към който се захващат другите неподвижни части на машината и с помощта на който машината се монтира към фундамента или друга основа. Също така служи като част от магнитната верига, през която се затваря основният магнитен поток на машината. Затова се изработва от материал, който има достатъчно механична якост и голяма магнитна проницаемост, обикновено се използва стомана. Чугун не се използва, защото има малка магнитна проницаемост. Обикновено статорното тяло е цилиндрично, но съществуват и други конструкции.

1.1.2. Главни полюси

Главните полюси на машината се изработват от листове електротехническа стомана, като пакетът се пресова и се притяга надлъжно с шпилки. От към страната, обърната към котвата, полюсът завършва с уширение, наречено полюсен накрайник. С това се постига по-добро разпределение на магнитната индукция във въздушната междина на машината (фиг. 1.2).



1-корпус; 2-полюсна бобина; 3-полюсен накрайник; 4-полюсно тяло

Фиг. 1.2.

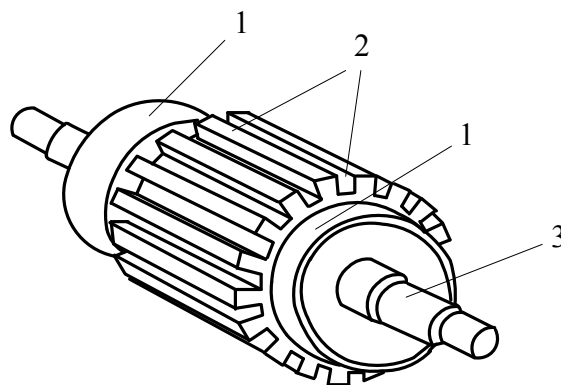
Полюсите се захващат към статорното тяло с болтове. Магнитното поле се създава от възбудителната намотка, която се изпълнява във вид на полюсни бобини, поставени върху тялото на главните полюси. Полюсните бобини са от меден проводник, намотан върху гилза изолационен материал. Разположената върху полюса бобина от възбудителната намотка по височина се разделя на 2 до 4 части, между които се оставят вентилационни канали, с което се постига по-добро охлаждане. Броят на главните полюси е четно число. При малките мощности полюсите обикновено са два, а в машините с голяма мощност достигат до десетки. Бобините на всички полюси се свързват последователно. Мощността, необходима за възбуждане, е около $0,5 \div 3\%$ от номиналната мощност на машината. Има решения без възбудителна намотка, като магнитният поток се създава от постоянни магнити.

1.1.3. Допълнителни полюси

За подобряване на условията на работа на машината между главните полюси се разполагат допълнителни. Върху допълнителните полюси се разполага намотка от меден проводник, като тя се включва последователно на котвената намотка. Монтирането към статорното тяло става с болтове.

1.1.4. Котва

Котвата на машината за постоянен ток се състои от тяло (котвен пакет), което е част от магнитната система на машината, котвената намотка, положена в каналите на котвения пакет, колектор и четков апарат. В съвременните машини се използва назъбено цилиндрично тяло от барабанен тип (фиг. 1.3).



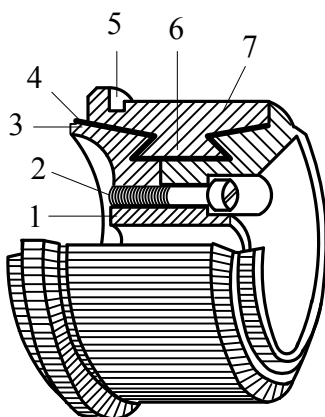
1-притягаща шайба (намоткодържател); 2-котвен пакет; 3-място за колектора

Фиг. 1.3.

Тялото представлява цилиндър, набран от изолирани листове електротехническа стомана, за да се намалят загубите от вихрови токове.

Котвената намотка се състои от секции, които се изпълняват от изолирани медни проводници с кръгло или правоъгълно сечение. Секциите се разполагат в каналите на котвения пакет, от чиито стени са изолирани. Въздушната междина между котвата и полюсите при малките машини е под 1mm, а в големите може да достигне 1 cm. За подобряването на охлаждането на вала се монтира вентилатор.

На фиг.1.4 е показан колектор на машина за постоянен ток.

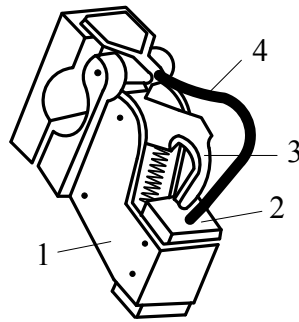


1-тяло; 2-притягащ болт; 3-притискащ диск; 4-изоляция; 5-ухо; 6-лястовича опашка; 7-ламела

Фиг. 1.4.

Той се състои от медни ламели 7 с трапецовидно сечение, изолирани една от друга, образуващи цилиндър. Вътрешната част на колекторните ламели 6 имат форма на лястовича опашка. Чрез тази част събраният колектор се укрепва с притягащите фланци 3 посредством миканитов цилиндър и миканитови конуси 4. Издадената част 5 на колекторните ламели се нарича ухо. В него е фрезован прорез, в който се запояват съединителните проводници с котвената намотка. Събраният колектор се запресова върху вала и окончателно се дообработва до правилна цилиндрична форма.

За осъществяване на галванична връзка между въртящия се колектор и захранващата мрежа се използва четков апарат, който се състои от четки, четкодържатели, четкови болтове, четкова траверса и токосъбирателни шини. На фиг. 1.5 е показана типична конструкция на четков апарат.



1-гнездо на четкодържателя; 2-четка; 3-притискащ механизъм с пружина; 4-гъвкав кабел

Фиг. 1.5.

Четките се поместват в четковите гнезда и посредством механизъм с пружини се притискат към колектора с $1,5 \div 2,5 \text{ N/cm}^2$. Четкодържателите се монтират на четковите болтове. Галваничната връзка между четките и четковите блокове се осъществява посредством гъвкав кабел. В тангенсиална посока всяка четка покрива 2-3 колекторни ламели. Четковите болтове, които имат най-често цилиндрична форма, се монтират в четковата траверса, като се изолират от нея с изолационни втулки. Четковата траверса се монтира на лагерните щитове или към статорното тяло. Обикновено се предвижда възможност за завъртане на траверсата, за да се установят четките в правилно положение спрямо полюсите.

1.2. Правило на лявата ръка и правило на дясната ръка

Принципът на действие на машината за постоянен ток се основава на взаимодействието на магнитното поле с ток, протичащ през котвената намотка и индуктирането на напрежение в котвената намотка вследствие на механичното ѝ движение в магнитното поле. За изясняване на принципа на действие се разглеждат две физични явления. Първо то е ако се внесе проводник, през който протича ток, в магнитно поле, между проводника и магнитното поле възниква сила, която действа върху проводника F_{np} . Големината на силата се определя от

$$F_{np} = BIl \sin \alpha . \quad (1.1)$$

където:

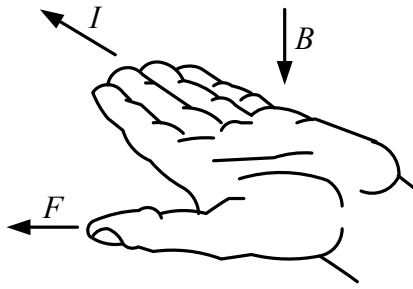
B - магнитната индукция на полето;

I - големината на тока през проводника;

l - активната дължина на проводника в магнитното поле;

α - ъгъл между проводника и направлението на магнитното поле.

Посоката на резултантната сила може да се определи по т.нар. „Правило на лявата ръка”, схематично показано на фиг.1.6.



Фиг.1.6.

Правилото гласи, че ако посоката на магнитната индукция е насочена към дланта на лявата ръка, а изпънатите пръсти съвпадат с посоката на тока, то възникналата сила е по посока на палеца, както е показано на фиг.1.6.

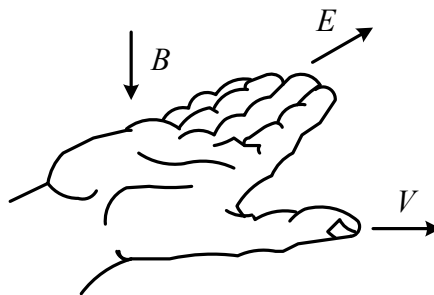
Другото физично явление се отнася до индуктирането на е.д.н. в проводник, т.е. ако се внесе проводник в магнитно поле, движен от външна сила, то в проводника ще се индуктира е.д.н., стойността на това напрежение е

$$e_{np} = Blv. \quad (1.2)$$

където:

v - периферната скорост на проводника.

Посоката на това е.д.н. се определя по „Правилото на дясната ръка”, схематично показано на фиг.1.7.

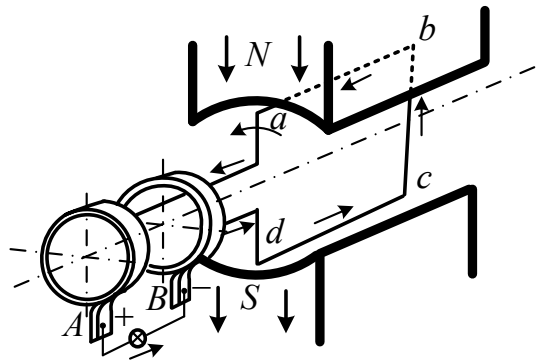


Фиг.1.7.

Правилото гласи, че ако посоката на магнитната индукция е насочена към дланта на дясната ръка, а изпънатият палец съвпада с посоката на скоростта на движение, то изпънатите пръсти показват посоката на индуктираното е.д.н. Разгледаните явления са в основата на принципа на действие на машината за постоянен ток.

1.2.1 Принцип на работа на машината за постоянен ток

Машината за постоянен ток по същество представлява преобразувател на енергия, който има свойството да преобразува механичната енергия в електрическа, т.е. да работи като генератор, или обратното - да преобразува електрическата енергия в механична - работа като двигател. На фиг.1.8 е показана опростена машина за постоянен ток.

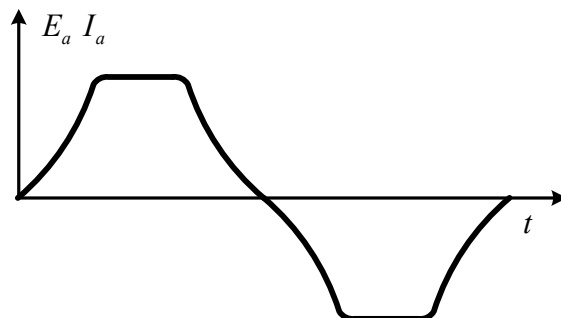


Фиг.1.8.

Когато машината работи като генератор, тя се задвижва от външен източник на механично движение (двигател, турбина и др.) с постоянна честота на въртене. Да предположим, че посоката на движение е обратна на часовниковата стрелка, както е показано на фиг.1.8. В такъв случай в проводниците на котвената намотка (секцията $abcd$) ще се индуцира е.д.н., посоката на което се определя по правилото на дясната ръка. Вследствие на симетрията в двата проводника на навивката ще се индуцират еднакви по големина е.д.н., които по контура ще се сумират така, че общото е.д.н. на котвата на разглежданата машина е

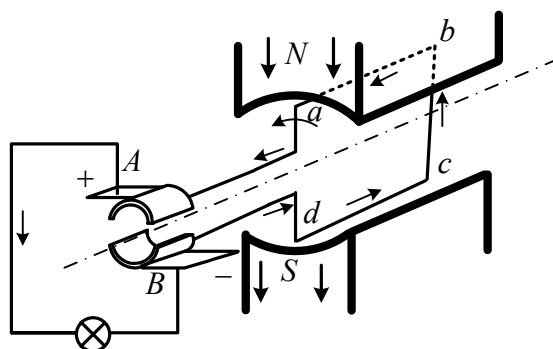
$$E_a = 2e_{np} = 2Blv. \quad (1.3)$$

От фиг.1.8 се вижда, че в дадения момент четката А е положителна, а четката В - отрицателна. При завъртане на котвата на 180° проводниците ab и cd разменят местата си, в съответствие с което се изменя и посоката на индуцираните в тях е.д.н. и полярността на четките А и В. Следователно както четките, така и във вътрешната верига, с която те са свързани, е.д.н. и токът са променливи с честота $f = pn$, където p са броя на двойките полюси. По форма кривата на е.д.н. в проводниците, в зависимост от времето, повтаря кривата на пространственото разпределение на индукцията B във въздушната междина на машината (фиг.1.9). При затворена верига между четките съответно ще протече ток.



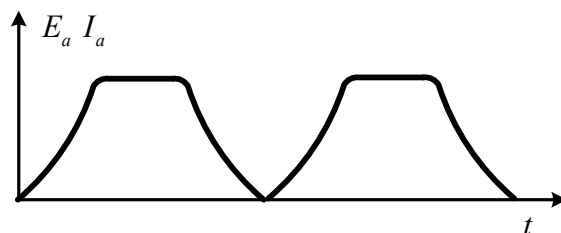
Фиг.1.9.

На фиг.1.10. е показана същата машина, в която са прибавени два сегмента, репрезентирани четките в реалната машина, контактуващи с А и В, като заедно образуват колекторно-четковия апарат.



Фиг.1.10.

Разположението на четките спрямо полюсите трябва да бъде такова, че при въртене на котвата, индуктираното е.д.н. в навивката трябва да бъде нула в момента на преминаване на четката от едната колекторна ламела към другата. По този начин всяка колекторна ламела ще контактува с тази страна на секцията, която се намира под съответния полюс с дадена полярност. Следователно колекторните ламели ще са само с една и съща полярност и ако затворим външната верига токът ще протича само в една посока. По такъв начин колекторът преобразува променливите е.д.н. и ток в постоянни величини, т.е. действа като механичен изправител. Формата на е.д.н. добива вида показан на фиг.1.11.



Фиг.1.11.

Пулсациите на напрежението и тока се намаляват до минимум посредством равномерно разпределение на секции по цялата периферия на котвеното тяло, всяка една от които е свързана с колекторни ламели.

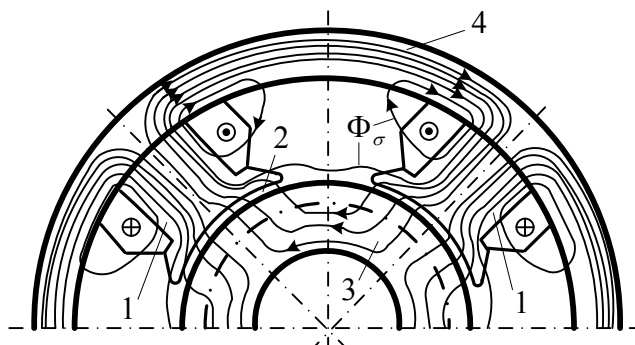
Условно е прието линията, която минава през центъра на котвата точно по средата между два съседни полюса, да се нарича геометрична неутрална линия (г.н.л.). Радиалната компонента на магнитната индукция на полето на главните полюси във въздушната междина на машината в геометричната неутрална линия е нула. При преминаване на проводниците на котвената намотка през г.н.л. индуктираното в тях е.д.н. преминава през нулева стойност и променя знака си. Следователно четките трябва да се разположат така, че при въртене на котвата те да преминават от една колекторна ламела към друга, когато активните страни на съответната секция преминават през геометричната неутрална линия.

Въпрос 2

Магнитна верига на ПТМ

2.1. Магнитна верига на машина за постоянен ток

Магнитна верига на машина за постоянен ток се нарича затвореният контур, по който преминава магнитният поток на машината. Магнитната верига включва феромагнитните части, които образуват магнитопровода и въздушните междини между статора и ротора. Измерени по направлението на магнитния поток, въздушните междини са много по-къси от останалите части на магнитната верига. Частите на магнитната верига се състоят от отделни участъци с различна форма и размери. Изпълнени са с различни материали. За дължина на всяка от частите по протежение на магнитния поток се взема дължината на средната магнитна силова линия. Магнитният поток се създава от главните полюси, като се затваря през въздушната междина, активния слой на котвата – зъби, канали и ярем, както и статорния ярем, свързващ главните полюси. На фиг.2.1 е показана магнитната верига на четириполусна машина за постоянен ток.



1-главни полюси; 2-въздушна междина; 3-ярем на ротора; 4-ярем на статора.

Фиг.2.1.

Тъй като каналите на котвата са запълнени с немагнитни материали (проводници и изолация) имащи голямо магнитно съпротивление, може да се счита, че магнитният поток се затваря главно през зъбите. Частта от общия магнитен поток, който не се затваря през активната част на котвата, а се затваря през въздуха около полюсите, се нарича магнитен поток на разсейване Φ_{σ} и не участва в преобразуването на енергията. Основната част на магнитния поток, която преминава през активния слой на котвата, се нарича основен магнитен поток Φ_0 на машината. Между потоците съществува следната зависимост:

$$\Phi_{II} = \Phi_0 + \Phi_{\sigma} = \left(1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_0}\right) \Phi_0 = \sigma \Phi_0. \quad (2.1)$$

където:

Φ_{II} - пълен магнитен поток;

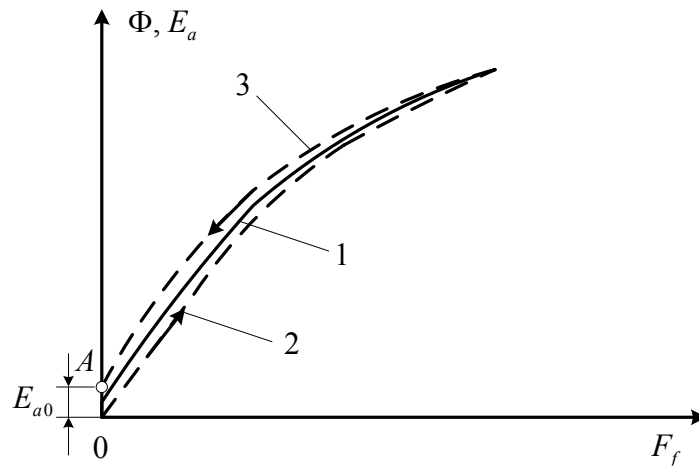
Коефициентът

$$\sigma = \frac{\Phi_{II}}{\Phi_0} = \frac{\Phi_0 + \Phi_{\sigma}}{\Phi_0} = 1 + \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_0} \quad (2.2)$$

характеризира магнитното разсейване на машината и се нарича коефициент на разсейването. Стойността му е в границите между 1,1 и 1,2.

При работа на машината под товар през котвената намотка и допълнителните полюси протича ток, който също създава магнитно поле. Следователно в образуването на магнитното поле на ПТМ при работата ѝ под товар вземат участие токът и м.д.н. на възбудителната намотка, м.д.н. на котвената намотка, както и м.д.н. на допълнителните полюси. Зависимостта между м.д.н. и големината на магнитния поток е нелинейна и определянето ѝ по изчислителен път е затруднено, като съществуват приблизителни методи за определянето ѝ. Магнитната характеристика получена по изчислителен път представлява линия, която преминава през началото на координатната система и според степента на насищане се огъва по посока на абцисната ос.

При снемане на тази характеристика по опитен път с нарастващи и намаляващи стойности на тока на възбуждане се получават два клона (фиг.2.2).



Фиг.2.2.

Несъвпадането на кривите 2 и 3 се дължи на хистерезиса. Отсечката $O\bar{A} = E_{a0}$ от ординатната ос представлява е.д.н., което се индуктира от остатъчния магнетизъм. За магнитна характеристика се приема средната крива 1, прекарана между кривите 2 и 3 (фиг.2.2).

2.2. Намагнитваща сила за част от магнитната верига

За провеждане в магнитната верига на необходимия за работата на машината магнитен поток е нужна намагнитваща сила (н.с). Големината на н.с. на една двойка полюси се определя от н.с., необходима за провеждане на магнитния поток през всяка от частите на магнитната верига. За изчислението на тази н.с. трябва да се знаят геометричните размери – сечението и дължината на съответната част от магнитната верига, а също и магнитните характеристики на материала, от който е направена. Магнитната индукция в разглежданата част от магнитната верига се приема, че е еднаква във всички сечения по цялата ѝ дължина. Редът за определяне на н.с. за част от магнитната верига с неизменно сечение е следният:

1. От зададената стойност на магнитния поток се определя магнитната индукция

$$B = \frac{\Phi}{S}. \quad (2.3)$$

Сечението S се определя от геометричните размери – дължина l и ширина b , на съответната част от магнитната верига. Това важи за частите от хомогенен материал. При частите с листов строеж – котвата и полюсите – активното сечение е по-малко от геометричното сечение. Причината е, че пакетът никога не може да бъде идеално притегнат и между листовите остават въздушни междини, които се включват в геометричното сечение на пакета. Освен това за намаляване на загубите от вихрови токове листовите

имат изолационен слой, който има малка магнитна проводимост и не участва в активното сечение. За определяне на активното сечение геометричното сечение се умножава с коефициент на запълване на пакета с магнитен материал k_c . Той изразява отношението на активното към геометричното сечение. Стойността му зависи от дебелината на ламарината и изолацията ѝ и е в границите от 0,9 до 0,97. Следва, за частите с листов строеж индукцията да се определя от

$$B = \frac{\Phi}{k_c S}. \quad (2.4)$$

2. За изчислената стойност на B се определя съществуващата напрегнатост на магнитното поле H . За целта при феромагнитните части на веригата се използват кривите $B = f(H)$, които се намират в справочниците по материалознание. В общ случай е в сила зависимостта

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (2.5)$$

където:

μ - магнитна проницаемост на материала от $B = f(\mu)$.

Трябва да се отбележи, че μ може да не зависи от индукцията, както е във въздушна среда.

3. За определената напрегнатост на магнитното поле и дължината на разглежданата част от магнитната верига се изчислява необходимата намагнитваща сила

$$F = Hl. \quad (2.6)$$

По такъв начин се изчислява н.с. на отделните части на магнитната верига, като н.с. за цялата верига за една двойка полюси се определя от

$$F_0 = F_{II} + F_{\delta} + F_3 + F_a + F_я. \quad (2.7)$$

където:

F_{II} - н.с. на главните полюси;

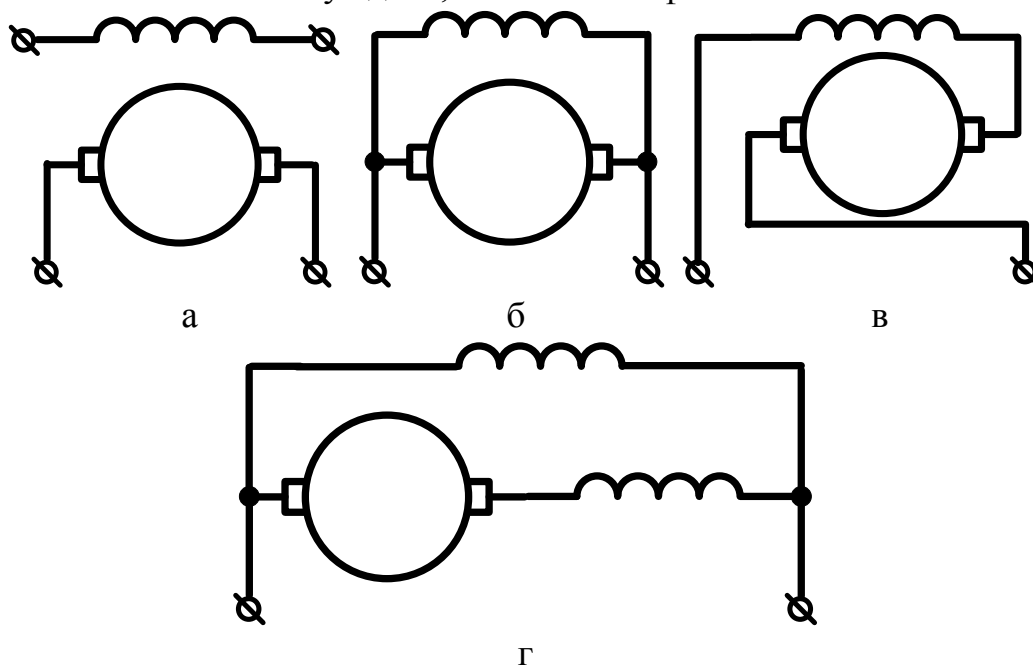
F_{δ} - н.с. във въздушната междина;

F_3 - н.с. на зъбите (приема се, че магнитният поток преминава само през зъбите);

F_a - н.с. на ярема на котвата;

$F_я$ - н.с. на статорния ярем.

В постояннотоковите машини на всеки полюс се поставят бобините на една или няколко възбудителни намотки, свързани по различен начин с котвената верига на машината. В зависимост от това се различават следните системи за възбуждане, показани на фиг.2.3.



Фиг.2.3.

Системата показана на фиг.2.3а се нарича независима, при която възбудителната намотка е включена към независим източник на постоянен ток и няма галванична връзка с котвената верига на машината. Системата от фиг.2.3б се нарича паралелна (шунтова), при която възбудителната намотка се включва паралелно на котвената верига. Показаната на фиг.2.3в система се нарича последователна (серийна), при която възбудителната намотка се включва последователно на котвената верига. Системата от фиг.2.3г се нарича смесена, при която върху полюсите са поставени две намотки. Едната се включва последователно, а другата – паралелно на котвената верига. Съществуват и комбинирани системи, при които се използват няколко възбудителни намотки, свързани по различен начин с котвената верига на машината.

Всеки вид възбудителна система определя различни свойства на постояннотоковата машина. Изборът на възбудителна система е от важно значение за работата на машината в зависимост от това какъв е работния режим – генераторен или двигателен.

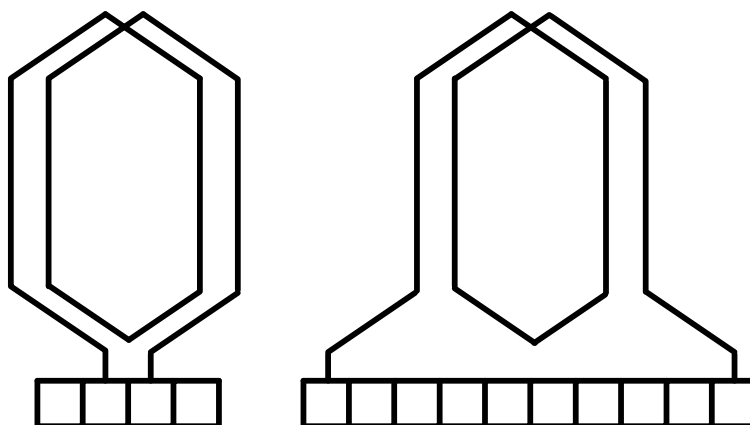
Съществуват машини за постоянен ток, на които основният магнитен поток се възбужда от постоянни магнити.

Въпрос 3

Намотки на ПТМ. Видове. Е.д.н. на ПТМ

Котвената намотка е една от най-важните части на ПТМ, тъй като с нейното непосредствено участие става преобразуването на енергията. Поради това към нея се поставят редица изисквания, по-важните от които са: 1) намотката трябва да бъде оразмерена за номиналното напрежение и ток на машината; 2) конструкцията на намотката трябва да осигурява добро токоотнемане от колектора, без недопустимо искрене; 3) намотката трябва да има необходимата електрическа, механическа и термична якост, с които да осигурява продължителен експлоатационен период на машината; 4) при зададени експлоатационни показатели (к.п.д. и др.) намотката трябва да бъде изпълнена с минимален разход на материал; 5) намотката трябва да бъде по възможност с проста технология.

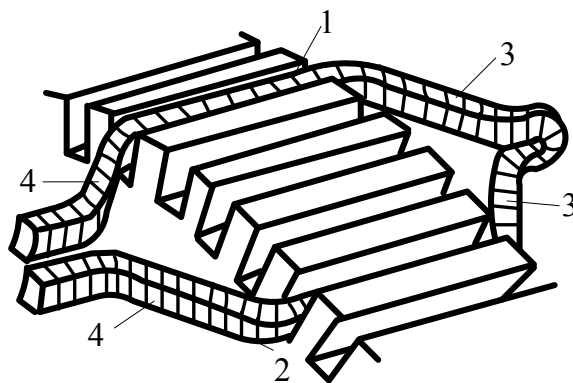
Основният елемент на котвената намотка е секцията, която може да се състои от една или няколко последователни навивки, чиито краища са запоени към съответни колекторни ламели (фиг.3.1).



Фиг.3.1.

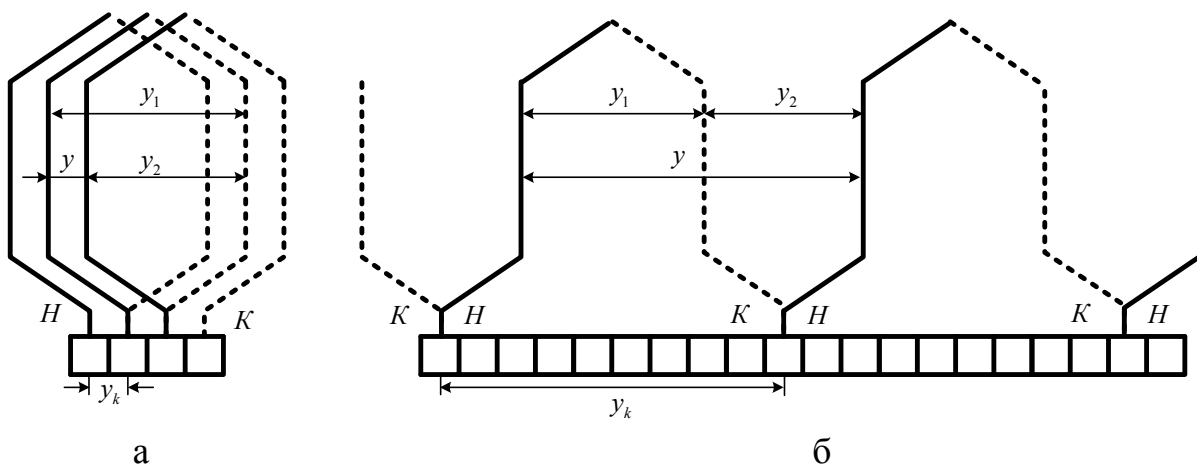
Еднонавивковите секции широко се използват в машините със средна и голяма мощност. В схемите на намотките за опростяване секциите се изобразяват винаги като еднонавивкови. Котвените намотки обикновено са двуслойни.

Страните на секциите се полагат в канали в два слоя – фиг.3.2. Едната страна на дадена секция лежи в горния край на един канал, а другата – в долния слой на друг канал.



1 и 2 – горна и долна активна страна; 3 и 4 – челни съединения
Фиг.3.2.

При схематичното изобразяване на намотките секционните страни в горния слой се чертаят с пълтна линия, а тези в долния – с прекъсната - фиг.3.3.



Фиг.3.3.

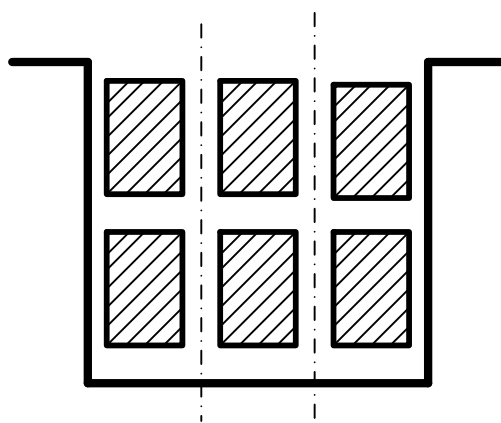
В зависимост от начина на свързване на намотките една с друга и с колекторните ламели се различават три основни типа котвени намотки: паралелна (листова) – фиг.3.3а; последователна (вълнова) – фиг.3.3б и смесена (жабешка).

Секциите, образуващи котвената намотка, се свързват една с друга в последователна верига по такъв начин, че началото **H** на следващата секция се запоява с края **K** на предходната секция към една обща колекторна ламела. Тъй като всяка секция има два края и към всяка колекторна ламела са запоеани два края от секции, следва, че броят на колекторните ламели **K** е равен на броя на секциите **S**.

Когато във всеки канал се намират само две активни страни - една в горния и една в долния, броят на каналите на котвата **Z** е равен на броя на секциите, т.е. $Z = S = K$. За намаляване на пулсациите на изправения ток и напрежение, а също, за да не се получи голямо напрежение между съседни колекторни ламели, броят на секциите и колекторните ламели трябва да е

достатъчно голям. Това изисква котвеният пакет да бъде с достатъчно голям брой канали. При зададен диаметър на котвата максималният брой канали е ограничен от механични и технологични съображения. Тесните зъби са механично слаби и са свързани с технологични проблеми при изработването на машината. В същото време значителна част от сечението на тесните канали се заема от каналната изолация на секциите, а за проводниците остава малко място, в резултат на което се намалява мощността на машината при зададения обем. Поради това във всеки слой на канала обикновено се разполагат по няколко секционни страни, чиито брой се означава с u_k . В такъв случай е валидно равенството $K = S = u_k Z$.

Когато в един канал във всеки слой са поставени u_k секционни страни, се казва, че реалният канал съдържа u_k елементарни канали. Следователно под елементарен канал се разбира канал, в който има само две активни страни на секции - една в горния и една в долния слой. На фиг.3.4 е показан реален канал с $u_k = 3$ елементарни канали.



Фиг.3.4.

При $u_k > 1$ са възможни два начина за изпълнение на котвената намотка:

1. Всички секции имат еднаква широчина (равносекционна намотка);
2. Част от секциите имат по-малка, а друга част по-голяма широчина така, че ако наличните активни страни лежат в един реален канал, крайните им активни страни са в различни канали. Такава намотка се нарича стъпална. При нея се получава подобряване на условията за токоотнемане от колектора. Обаче тази намотка е сложна в технологично отношение и по-скъпа, затова се използва рядко, и то в машини с голяма мощност $P_n \geq 500 \text{ kW}$.

При въртенето на котвата в магнитното поле в котвената намотка се индукира е.д.н. Големината на това е.д.н. в един от проводниците на

котвата, намиращ се на разстояние x от геометричната неутрална линия и движещ се със скорост v , може да се определи от

$$e_x = v l_u B_{\delta x} . \quad (3.1)$$

където:

$B_{\delta x}$ - магнитната индукция във въздушната междина в точката на разстояние x от геометричната неутрална линия;

l_u - изчислителна дължина на котвата;

Е.д.н. на машината е равно на е.д.н., индуцирано в един от паралелните ѝ клонове на котвената намотка. Тъй като котвата има N броя проводници, при $2a$ броя паралелни клона, броят на последователно свързаните проводници в един паралелен клон е $\frac{N}{2a}$. Следователно е.д.н. на машината е

$$E_a = e \frac{N}{2a} = v l_u B_{\delta cp} \frac{N}{2a} . \quad (3.2)$$

където:

$B_{\delta cp} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{\delta x} dx$ - средна стойност на магнитната индукция по

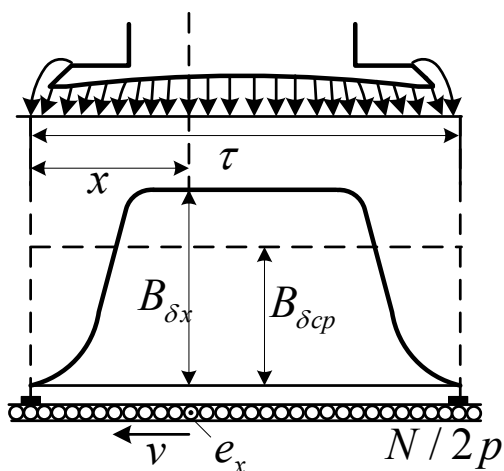
дължината на полюсното деление τ ;

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ - полюсно деление – разстоянието по периферията на котвата,

съответстващо на един полюс - фиг.3.5;

D - диаметър на котвата;

p - брой двойки полюси.



Фиг.3.5.

При анализа на машините за постоянен ток по-удобно е да се работи със скоростта на въртене, поради това периферната скорост v може да се замени със скоростта на въртене n

$$v = \pi D n = 2 p \tau n \quad (3.3)$$

от тук следва, че

$$E_a = 2 p \tau n l_u B_{\delta cp} \frac{N}{2a} \quad (3.4)$$

Тъй като произведението

$$\tau l_u B_{\delta cp} = S_u B_{\delta cp} = \Phi, \quad (3.5)$$

за окончателния израз на е.д.н. на машината се получава

$$E_a = \frac{pN}{a} \Phi n \quad (3.6)$$

Величините p, N и a имат конструктивен характер и за една изпълнена машина са неизменни. Те могат да бъдат заменени с един общ коефициент отчитащ конструктивните особености на машината, наречен още машинна константа

$$c_E = \frac{pN}{a} \quad (3.7)$$

Тогава за е.д.н. на машината се получава

$$E_a = c_E \Phi n, \quad (3.8)$$

От (3.8) се вижда, че е.д.н. E_a , което се индутира в котвената намотка, може да се изменя посредством изменението на магнитния поток и ъгловата скорост. Когато машината за постоянен ток работи като генератор обикновено $n = const$ и генерираното напрежение се регулира посредством изменението на магнитния поток.

При изместване на четките от неутралната линия, напрежението между тях се намалява. При изместени четки на $\alpha = 90^\circ$, $E_a = 0$.

За правилното полагане на секциите от котвената намотка в каналите на котвения пакет и свързването им една с друга и с колектора, е необходимо да се знаят стъпките на намотката по котвата и по колектора.

Първата частична стъпка на намотката y_1 определя широчината на секцията. Тя представлява разстоянието между двете активни страни на една секция, изразено в реални или елементарни канали (фиг.3.3). За да се

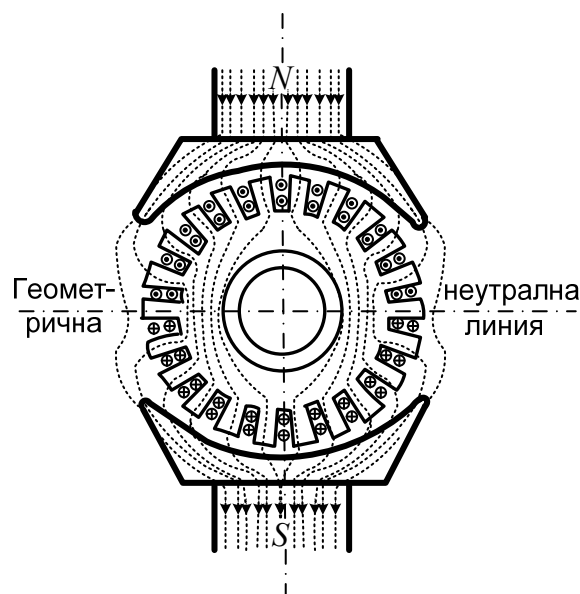
индуктира максимално е.д.н. в секцията, нейната широчина y_1 трябва да бъде равна на полюсното деление τ . В едно полюсно деление се съдържат $Z/2p$ канала. Често пъти обаче броят на каналите Z не се дели без остатък на броя на полюсите $2p$, докато стъпката трябва да бъде равна на цяло число канални деления. За да се удовлетвори това условие, тя се скъсява или удължава. При $y_1 = \tau$ намотката се нарича диаметрална; при $y_1 < \tau$ - със скъсена стъпка и при $y_1 > \tau$ - с удължена стъпка. Удължената стъпка се среща рядко, заради повишения разход на материал.

Втората частична стъпка на намотката y_2 представлява разстоянието, изразено в реални или елементарни канали, от втората активна страна на дадена секция до първата активна страна на секцията, която е свързана последователно с нея. Резултатната стъпка на намотката y представлява разстоянието, изразено в реални или елементарни канали между съответните активни страни на две секции, които са свързани последователно.

Въпрос 4

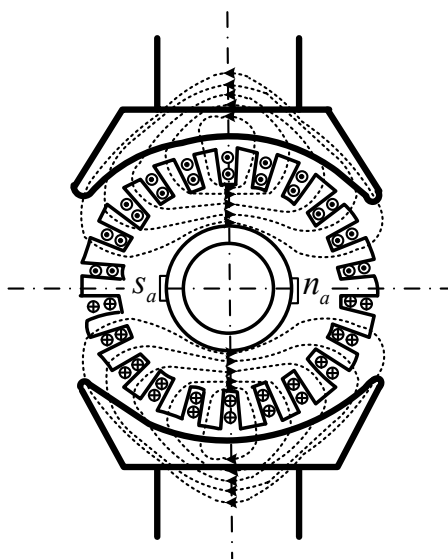
Реакция на котвата на ПТМ

При работа на машината за постоянен ток на празен ход ($I_a = 0$), нейното магнитно поле се създава само от магнитодвижещото напрежение (м.д.н) на възбудителната намотка. Картината на това магнитно поле при двуполюсна намотка е показана на фиг. 4.1.



Фиг.4.1.

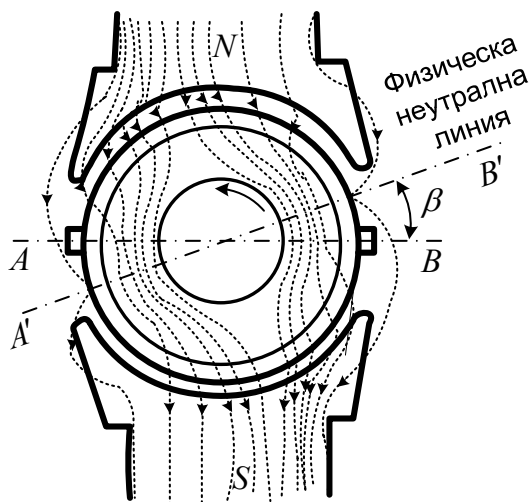
При натоварване на машината ($I_a \neq 0$) котвената намотка създава собствено магнитно поле, картината на което при четки в геометричната неутрална линия и отсъствие на възбудителен ток е показана на фиг.4.2.



Фиг.4.2.

Както се вижда от фиг.4.2, оста на котвеното поле съвпада с оста на четките и е перпендикулярна на оста на полюсите.

При едновременното съществуване на магнитните полета на котвата и на индуктора, те се наслагват и образуват резултантно магнитно поле, характерът на което е показан на фиг.4.3.

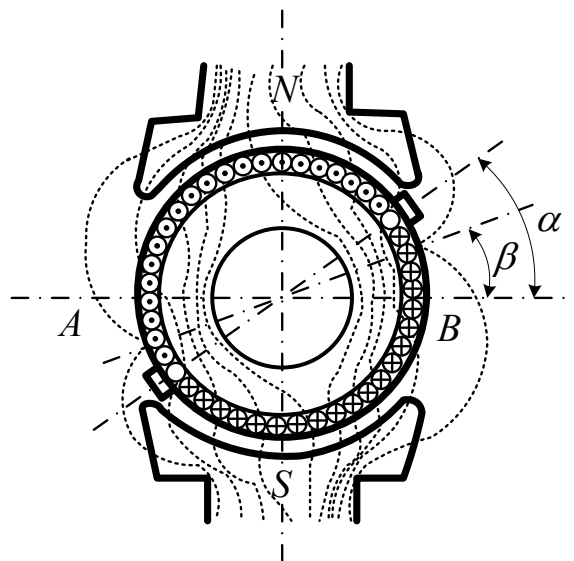


Фиг.4.3.

Пространственото разпределение на резултантното магнитно поле във въздушната междина на машината и магнитния поток при натоварване се оказват различни от тези на празен ход. Влиянието на м.д.н. на

котвената намотка върху полето на машината, възбудено от възбудителната намотка, се нарича реакция на котвата.

В зависимост от това дали машината работи като двигател или в генераторен режим, резултантното магнитно поле се измества в определена посока. В режим на генератор полето се измества по посоката на въртене, а в двигателен режим се измества срещу посоката на въртене. И в двата случая резултантното магнитно поле се разпределя несиметрично спрямо оста на главните полюси. Под действието на реакцията на котвата неутралната линия по повърхността на котвата, на която съответства $B_s = 0$, се измества от геометричната неутрална линия AB на някакъв ъгъл β в положение $A'B'$ (фиг.4.3), която се нарича физическа (действителна) неутрална линия. При генератор физическата неутрална линия е отместена по посоката на въртене на котвата, а при двигател - в обратна посока. От тук следва, че за нормална работа на колекторно-четковия апарат е необходимо четките да се изместват в същата посока на ъгъл β така, че да попаднат в неутралната линия. Освен това при машините без допълнителни полюси за подобряване на комутацията четките следва да бъдат изместени на ъгъл $\alpha > \beta$ (фиг. 4.4).



Фиг.4.4.

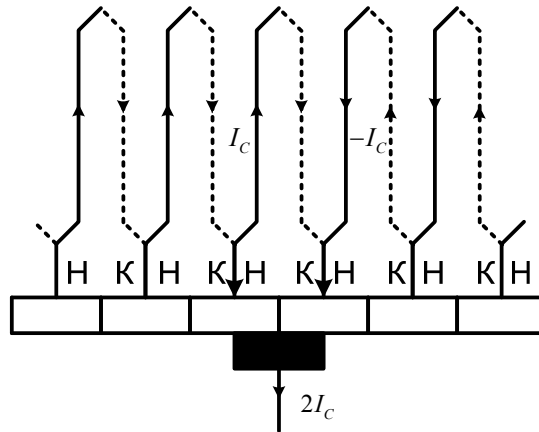
При изменение на натоварването физическата неутрална линия се измества. Ако четките се установят в определено положение, съответстващо например за номинален товар, при друго натоварване комутацията ще бъде влошена. За да се поддържа добрата работа на машината, четките трябва непрекъснато да се местят, като се наблюдава искренето, което внася неудобство при експлоатацията и затова изместване на четките се използва ограничено само при малки мощности, които работят с константно натоварване.

Въпрос 5

Комутация

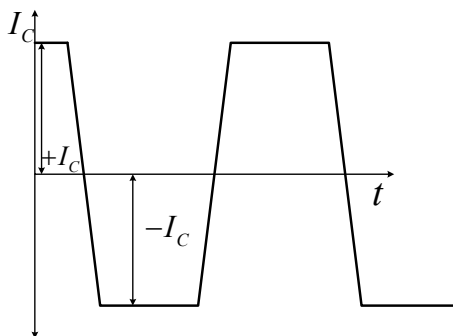
5.1. Общи сведения

При работата на машината за постоянен ток с въртенето на котвата непрекъснато се извършва промяна на секциите, които контактуват с четките на колектора. На фиг.5.1 е показана част от листовата намотка.



Фиг.5.1.

От фигурата се вижда, че по отношение на четката съответните секции на котвената намотка са разделени на два паралелни клона. В секциите в лявата страна на четката токът I_c е с посока от началото към края на секциите. В секциите от дясната страна на четката токът протича от края към началото т.е. в противоположна посока. При въртене на котвата секциите непрекъснато преминават от единия клон в другия. Това става когато секциите преминават през неутралната линия, където $B = 0$, а следователно индуктираните е.д.н. са равни на нула. При достигане на неутралната зона секциите последователно напускат паралелния клон, в който са били и чрез колекторните ламели и четките се свързват накъсо за известно време, след което се включват в следващия паралелен клон, през което време токът се изменя от $+I_c$ до $-I_c$ (фиг.5.2).



Фиг.5.2.

Този процес на изменение на тока в секциите на котвената намотка при последователното им преминаване от един паралелен клон в друг се нарича комутация. В по-широк смисъл под комутация се разбират всички явления, които възникват под четките при работата на колекторните електрически машини. По своята физическа същност комутацията е сложен процес, при който факторите от електромагнитен, електрохимичен, механичен и топлинен характер се преплитат.

При работа на постояннотоковите машини вследствие на различни причини е възможна появата на слабо или по-силно искрене между колектора и четките. Ако липсва искрене, както и при слабо искрене се смята, че комутацията е добра. В случаите на искрене под четките и тяхното бързо износване се казва, че комутацията е лоша. От практическа гледна точка е важно комутацията да става без значително искрене на контактните повърхности на четките, тъй като силното искрене поврежда повърхностите на колектора и четките, и прави работата на машината невъзможна.

5.2. Причини за искрене на четките

5.2.1. Механични причини

Периферната скорост на колектора може да достигне 15-25 m/s, а в някои случаи може да достигне по-високи стойности. Това означава, че всяка секунда под четката навлизат няколко хиляди колекторни ламели и съответно толкова пъти върху нея действат слаби или по-силни удари от страна на колектора. При тези условия голямо значение имат точността на изработване на колектора, механичната якост на четките и елестичността на пружините на четкодържателите, притискащи четките към колектора. Искренето е свързано с нарушаване на контакта между четките и колектора. Това нарушение се предизвиква от неравности по повърхността на колектора, елиптичност на колектора или биене, когато то превишава $0,2 \div 0,3$ mm, недостатъчна шлифовка на четките към колектора, изпъкналост на отделни колекторни ламели, изпъкналост на слюдената изолация между колекторните ламели, засядане на четките в четкодържателите и други причини от механичен характер.

5.2.2. Електромагнитни причини

Те са свързани с характера на протичане на електромагнитните процеси в комутиращите секции. В резултат на тези процеси даже и в идеално състояние на колекторно-четковия апарат при излизане на колекторните ламели изпод четките става прекъсване на електрическата верига и възниква кратка електрическа дъга, която поврежда ламелите и четките. Трябва да се отбележи, че искренето, предизвикано от

електромагнитни причини, поврежда повърхността на колектора и довежда до вибрации на четките, т.е. допринася за възникване на искрене от механични причини. Неустойчивият четков апарат, обусловен от механични причини, влияе върху електромагнитните процеси в комутиращите секции. Следователно искренето между четките и колектора е резултат от съвместното действие на много фактори.

В експлоатацията може да се наблюдава искрене със значително по-голяма интензивност в случаите, когато машината работи с претоварване или с повишена честота на въртене. Появилата се под четките дъга изгасва, като оставя след себе си йонизирано пространство. Поради това следващата дъга възниква в по-благоприятни условия, разтяга се на по-голямо разстояние по колектора и накрая може да се разпростре до четката с противоположна полярност, т.е. да прерастне в кръгов огън. За предотвратяването на възможността за възникване на кръгов огън е необходимо да се вземат мерки за подобряването на комутиацията.

Въпрос 6

Средства за подобряване на комутиацията

Както беше отбелязано в предходния въпрос, подобряването на комутиацията е от съществено значение за правилната работа на машината за постоянен ток. Съществуват технически решения подобряващи условията на комутиация.

6.1. Увеличаване на съпротивлението във веригата на комутиращите секции

Един от начините за увеличаване на съпротивлението на комутиращите секции е да се включат допълнителни съпротивления в съединителните проводници между котвената намотка и колектора. Това обаче е нецелесъобразно, тъй като загубите на мощност в тези съпротивления намаляват к.п.д. на машината, а освен това при претоварване може да се достигне до тяхното прегряване, с което машината излиза от строя.

По-ефикасно за подобряването на комутиацията е използването на четки с подходящи характеристики. От гледна точка на постигане на добра комутиация е целесъобразно да се използват твърди четки с голямо преходно съпротивление. Те обаче допускат малка плътност на тока в четковия апарат, което изисква увеличаването на повърхнината на колектора. Освен това загубите в тях са големи, поради което използването на метода не е целесъобразно и за това приложението му също е ограничено.

За нормални постояннотокови машини обикновено се използват графични четки, а при по-тежки условия на комутация (тягови, кранови и други двигатели) - въглено-графитни или електрографитни четки. Медно-графитни четки са подходящи за машини за ниски напрежения.

Най-голямо съпротивление имат твърдите въглено-графитни четки, по-малко съпротивление имат графитните и електрографитните четки и най-малко - меките медно-графитни или бронзово-графитните.

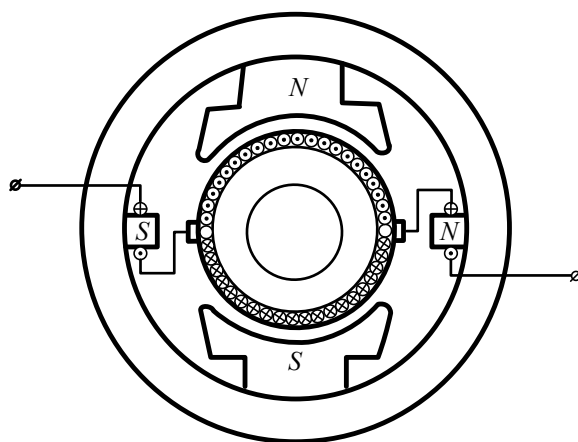
6.2. Изместване на четките

При изместване на четките зад физичната неутрална линия, както беше отбелязано във въпрос 4, се постига подобряване на комутацията. При машините с паралелно или независимо възбуждане, където магнитният поток $\Phi = const$, най-добрите условия за комутация при даден ъгъл се постигат само при определен товар. При машините за постоянен ток с последователно възбуждане, които работят с наситена магнитна система при еднакво ъглово положение на четките може да се осигури добра комутация при сравнително широк диапазон на изменение на товара.

Фиксирането на четките се извършва визуално, като при изместването им се наблюдава степента на искрене под тях. При работа в режим на генератор, четките се изместват по посоката на въртенето, а в двигателен - в обратна посока.

6.3. Допълнителни (комутационни) полюси

Най-ефикасният начин за подобряване на комутацията, прилаган в съвременните машини за постоянен ток, е създаване в зоната на комутацията на комутиращо магнитно поле посредством допълнителни полюси. Те се поставят между главните полюси и са толкова на брой, колкото са и главните полюси (фиг.6.1).



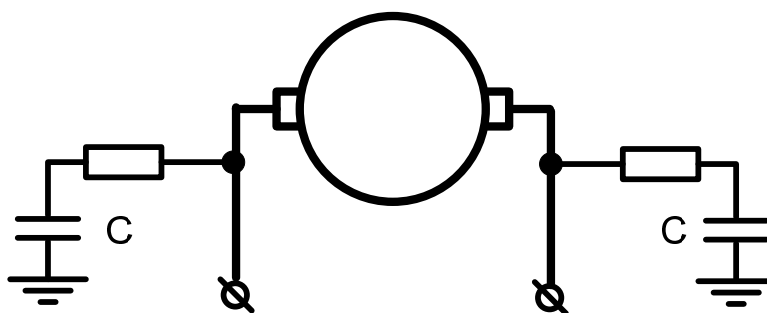
Фиг.6.1.

Тъй като м.в.н. на реакцията на котвата F_a зависи от котвения ток, за тяхното компенсиране м.в.н. на допълнителните полюси $F_{дп}$ и индукцията на комутиращото поле също следва да бъдат пропорционални на котвения ток. Това условие може да се удовлетвори, ако намотката на допълнителните полюси се свърже последователно с котвената намотка и магнитната верига е ненаситена. Поради това при номинално натоварване в тях се допуска индукция не по-голяма от $0,8 \div 1$ Т.

Почти всички двигатели за постоянен ток се изработват с допълнителни полюси, тъй като с това се постига възможност за значително по-голямо натоварване на котвата, с което се намаляват размерите и цената на машината.

6.4. Потискане на радиосмущенията

Високочестотните колебания, които възникват в намотката на машината и на колектора, свързани с комутацията, могат да станат източник на радиосмущения. За тяхното отстраняване намотките на машината се шунтират с подходящо изчислени кондензатори (фиг.6.2).



Фиг.6.2.

Кондензаторите се включват между изводите на машината и статорното тяло. Всеки кондензатор е снабден с предпазител за защита от късо съединение. Наличието на кондензатори не отстранява напълно радиосмущенията, но понижава тяхното ниво до допустими граници.

Въпрос 7

Постояннотокови генератори (ПТГ), видове. ПТГ с независимо възбуждане. Характеристики

7.1. Постояннотокови генератори, видове

В зависимост от начина на включване на котвената намотка спрямо възбудителната, генераторите биват с независимо възбуждане (електромагнитно или с постоянни магнити) и генератори със самовъзбуждане. Генераторите със самовъзбуждане биват с паралелно

възбуждане, с последователно или със смесено възбуждане. Във всички генератори с електромагнитно възбуждане за възбуждането се изразходва около $0,3 \div 5\%$ от номиналната мощност на машината. Ниските стойности се отнасят за големите мощности, а високите – за машини с мощност около $1 kW$.

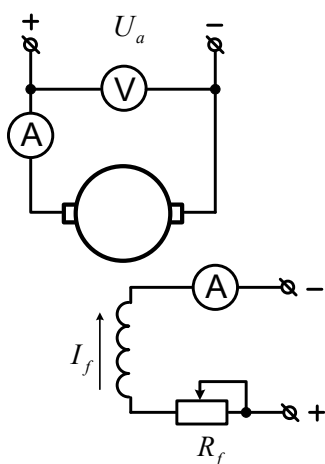
Свойствата на генераторите се анализират посредством характеристики, които установяват зависимостта между основните величини, определящи работата на генератора. Такива основни величини са:

- напрежението на изводите на генератора U_a ;
- възбудителният ток I_f ;
- котвеният ток I_a ;
- честотата на въртене n .

Обикновено генераторите работят при $n = const$. Основен фактор, който определя свойствата на генераторите, е начина на възбуждане.

7.2. Генератор с независимо възбуждане. Характеристики

Този тип генератор се характеризира с това, че възбудителната намотка се захранва от отделен, независим източник на постоянен ток (фиг.7.1).



Фиг. 7.1.

При този генератор възбудителният ток I_f е напълно независим от котвения ток I_a и напрежението на изводите на машината.

Както при всички генератори, така и за генератора с независимо възбуждане за изучаване на неговите свойства особена важност имат следните пет характеристики:

- характеристика на празен ход;

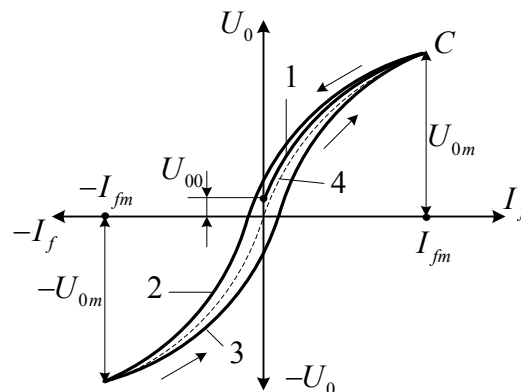
- характеристика на късо съединение;
- външна характеристика;
- товарна характеристика;
- регулационна характеристика.

7.2.1. Характеристика на празен ход

Характеристиката на празен ход (х.п.х.) представлява зависимостта на напрежението на изводите на генератора $U_0 = E_a$ от възбудителния ток I_f при товарен ток I_a равен на нула и постоянна скорост на въртене:

$$U_a = f(I_f) \text{ при } I_a = 0 \text{ и } n = const$$

При $I_f = 0$ на изводите на машината има някаква стойност на напрежението, която е $U_{00} \approx 2 \div 3\%$ от номиналното, което се дължи на остатъчния магнитен поток. При нарастване на възбудителния ток от $I_f = 0$ до $I_f = I_{fm}$ напрежението расте по крива 1 отначало бързо, а след насищането по-бавно до U_{0m} (фиг.7.2).



Фиг.7.2.

Обикновено възбудителният ток се увеличава до такава стойност на I_{fm} , при която напрежението на генератора достига до $U_{0m} = (1,1 \div 1,25)U_{ан}$.

Ако след достигане на $I_f = I_{fm}$ се започне намаляване на I_f до $I_f = 0$, след което се промени поляритетът му и се продължи с неговото изменение от $I_f = 0$ до $-I_{fm}$, ще се получи кривата 2. При по-нататъшно изменение на възбудителния ток от $-I_{fm}$ до $+I_{fm}$ се получава кривата 3, завършваща в т. С, която заедно с кривата 2 образува хистерезисен цикъл, което се дължи на явлението хистерезис в магнитната верига на индуктора. Средната линия 4 показана с прекъснатата линия, представлява изчислената характеристика на празен ход на генератора. Трябва да се отбележи, че при

снемането на х.п.х. изменението на възбудителния ток трябва да се извършва само в една посока, тъй като в противен случай точките няма да лежат на даден хистерезисен цикъл, а ще се разсейват.

При въртене на генератора с константна скорост, напрежението U_0 е равно на E_a , което се индуцира в котвената намотка:

$$U_0 = E_a = c_E \Phi n. \quad (7.1)$$

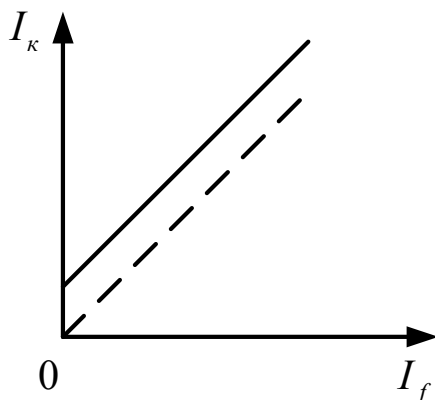
Следователно х.п.х. в друг мащаб $U_0 = f(I_f)$ представлява зависимостта $\Phi = f(I_f)$. Характеристиката на празен ход дава възможност да се съди за насищането на магнитната система на машината при номинално напрежение и да се построят редица други характеристики на машината.

7.2.2. Характеристика на късо съединение

Характеристиката на късо съединение (х.к.с) представлява зависимостта на котвения ток от възбудителния ток при затворена накъсо котвена верига и константна скорост на въртене:

$$I_a = I_k = f(I_f) \text{ при } U_a = 0 \text{ и } n = const$$

За да се снее тази характеристика генераторът се завърта с номинална скорост и котвената верига са затваря накъсо през амперметър, а на възбудителната намотка се задава определен възбудителен ток. Опитът започва от $I_f = 0$, който постепенно се повишава до достигане на котвения ток $I_k = (1,25 \div 1,5) I_{an}$. При $I_f = 0$ вследствие на остатъчния магнитен поток токът на късо съединение $I_k \neq 0$ като при машини с голяма мощност може да достигне и дори да надмине номиналната стойност. Поради това преди снемането на х.к.с е целесъобразно да се размагнити при отворена котвена верига и възбудителен ток, чиято полярност е такава, че да действа срещу остатъчния магнитен поток. В размагнитената машина характеристиката започва от нулева стойност. Ако характеристиката не е снета при нулев остатъчен магнитен поток, тя трябва да се транслира в нулата на координатната система (фиг.7.3).



Фиг.7.3.

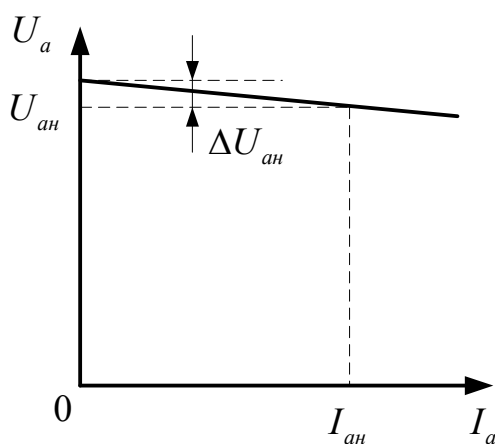
Характеристиката на късо съединение служи за анализиране на реакцията на котвата върху резултантния магнитен поток, за което са разработени различни методи.

7.2.3. Външна характеристика

Външната характеристика представлява зависимостта на напрежението на изводите на генератора от товарния ток при постоянна честота на въртене и постоянен възбудителен ток:

$$U_a = f(I_a) \text{ при } n = const \text{ и } I_f = const$$

На фиг.7.4. е показан вида на външната характеристика на генератор с независимо възбуждане.



Фиг.7.4.

От външната характеристика се вижда, че с увеличение на товарния ток напрежението на изводите на генератора постепенно намалява. Това се дължи на пада на напрежение в котвената верига $I_a R_a$, а от друга – на

намалението на е.д.н. E_a вследствие на намаляването на магнитния поток под действието на реакцията на котвата.

За експериментално снемане на външната характеристика генераторът се завърта с номинална скорост и се установява ток $I_f = I_{fн}$, за който при $I_a = I_{ан}$ напрежението на изводите на генератора е $U_a = U_{ан}$. След това генераторът постепенно се разтоварва до празен ход. При преминаването от номинален товар към празен ход, напрежението на генератора нараства с $\Delta U_{ан}$. Тази величина се нарича номинално изменение на напрежението на генератора и обикновено се задава в проценти от номиналното напрежение:

$$\Delta U_{ан} \% = \frac{\Delta U_{ан}}{U_{ан}} 100. \quad (7.2)$$

За генераторите с независимо възбуждане $\Delta U_{ан}$ е в граници $\Delta U_{ан} = (5 \div 15)\%$. Съществуват и графични методи за построяването на външната характеристика.

7.2.4. Товарна характеристика

Товарната характеристика представлява зависимостта на напрежението на изводите на генератора от възбудителния ток при константна стойност на товарния ток и постоянна скорост на въртене:

$$U_a = f(I_f) \text{ при } I_a \neq 0 = const \text{ и } n = const$$

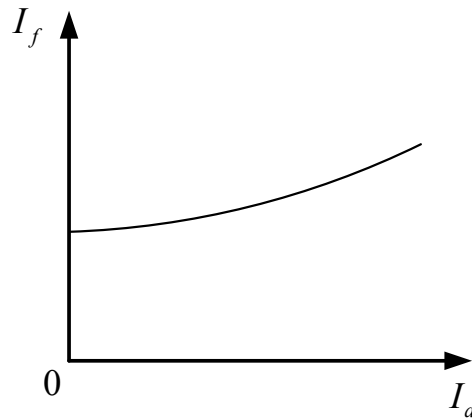
Товарната характеристика е подобна на характеристиката на празен ход, като преминава по-ниско от нея вследствие на пада на напрежение в котвената верига и влиянието на реакцията на котвата. Характеристиката на празен ход може да се разглежда като граничен случай на товарната характеристика при $I_a = 0$. Обикновено товарната характеристика се снима за $I_a = I_{ан}$. Експерименталното ѝ снемане се извършва като х.п.х., но при поддържането на определена стойност на котвения ток.

7.2.5. Регулационна характеристика

Регулационната характеристика представлява зависимостта на възбудителния ток от котвения за поддържане на постоянно напрежение на изводите на генератора при постоянна скорост на въртене:

$$I_f = f(I_a) \text{ при } U_a = const \text{ и } n = const$$

Тази характеристика показва как трябва да се изменя възбудителния ток при изменение на товара, за да се поддържа (регулира) напрежението на изводите на котвата постоянно. С увеличаването на котвения ток трябва да се увеличи и възбудителния, за да се компенсира пада $I_a R_a$ и реакцията на котвата (фиг.7.5).



Фиг.7.5.

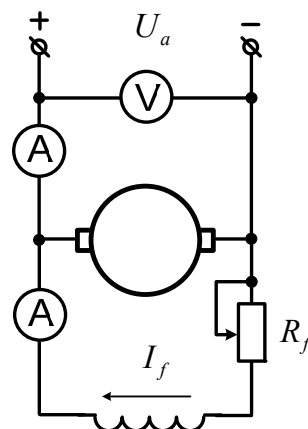
За генератори с независимо възбуждане е необходимо при преминаване от празен ход до номинално натоварване I_f да се увеличи с $15 \div 25\%$.

Въпрос 8

ПТГ с паралелно, последователно и смесено възбуждане

8.1. ПТГ с паралелно възбуждане

Генераторът с паралелно възбуждане се характеризира с това, че възбудителната намотка е включена паралелно на котвената верига и енергията за възбуждането се осигурява от самия генератор. Схемата на включване на такъв генератор е показана на фиг.8.1.



Фиг.8.1.

За да работят в нормални условия генераторите с паралелно възбуждане е необходимо да бъдат самовъзбудени. Самовъзбуждането на генератора е възможно при изпълнение на определени условия.

8.1.1. Самовъзбуждане на генератора с паралелно възбуждане

Самовъзбуждането е възможно само ако машината има остатъчен магнетизъм, който при въртене на котвата индуцира е.д.н. $E_{ост.}$. Под неговото действие във възбудителната намотка протича малък ток i_f . Този ток предизвиква увеличаване на магнитния поток, а следователно и индуцираното е.д.н., което на свой ред предизвиква увеличението на тока и така процесът на самовъзбуждане продължава докато той се установи.

Обикновено работилите машини имат остатъчен магнетизъм поради наличието на хистерезис в магнитната им система. Ако такъв липсва, той се създава чрез включването на възбудителната намотка към външен източник на постоянен ток.

Друго условие за самовъзбуждане е посоката на тока. Тя трябва да бъде такава, че протичащият ток трябва да предизвиква увеличаване на магнитния поток, ако протича в обратна посока самовъзбуждането е невъзможно.

За изясняване на третото условие за самовъзбуждане е необходимо да се анализира процесът на изменение на тока протичащ в контура възбудителна намотка – котва в режим на празен ход ($n = n_n = const$). За този контур може да се запише диференциалното уравнение, съставено по втори закон на Кирхоф:

$$e_a = i_f R_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \quad (8.1)$$

където:

e_a - моментна стойност на индуцираното е.д.н. в котвената намотка;

i_f - моментна стойност на възбудителния ток;

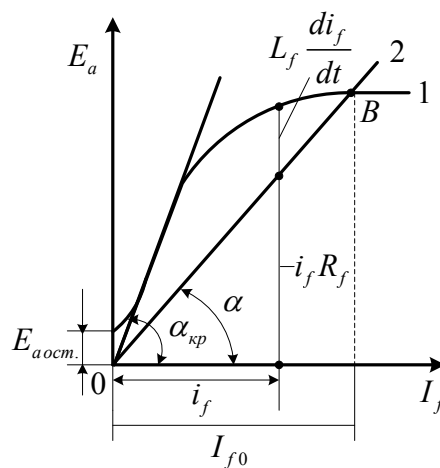
$R_f = r_f + r_{pf} + R_a$ - общо активно съпротивление на разглеждания контур, включващо съпротивлението на възбудителната намотка r_f , съпротивлението на регулиращия реостат r_{pf} и на котвената верига;

L_f - обща индуктивност на възбудителната намотка и на котвата.

От (8.1) се извежда израз за производната на тока i_f :

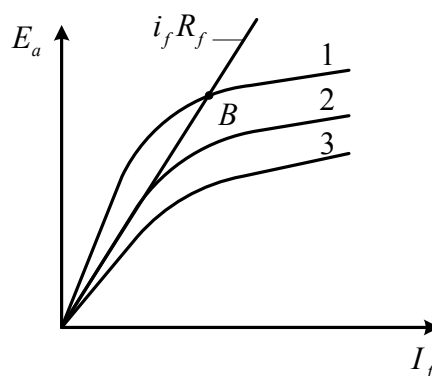
$$\frac{di_f}{dt} = \frac{e_a - i_f R_f}{L_f}. \quad (8.2)$$

Както се вижда от (8.2) ако разликата $e_a - i_f R_f$ е положителна, то $\frac{di_f}{dt} > 0$ и следователно протичащият ток нараства, и процесът на самовъзбуждане се осъществява. Това означава, че съществува гранична стойност на R_f , над която $e_a - i_f R_f$ е отрицателна и $\frac{di_f}{dt} < 0$, и самовъзбуждането не се реализира. На фиг.8.2. е показана кривата на празен ход на генератора и характеристиката на неговата възбудителна верига $i_f R_f = f(i_f)$ при $R_f = const$. Тя представлява права линия, преминаваща от началото на координатната система под ъгъл α спрямо абсисната ос. На граничната стойност на R_f съответства и граничен ъгъл $\alpha_{кр.}$.



Фиг.8.2.

Е.д.н. E_a зависи също така и от честотата на въртене n . За различни стойности на скоростта на въртене се получават различни характеристики на празен ход. На фиг.8.3. са показани три характеристики на празен ход и една характеристика на възбудителната верига.

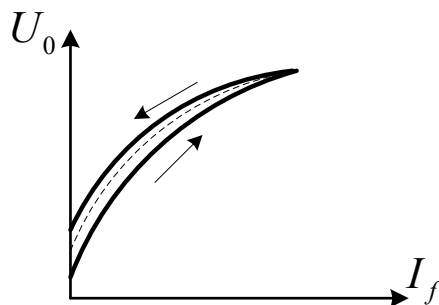


Фиг.8.3.

От фиг.8.3. се вижда, че при определена стойност на R_f за крива 1 самовъзбудването е възможно. За крива 2 съпротивлението R_f е гранично, а за крива 3 самовъзбудването е невъзможно. Следователно на всяка стойност на съпротивлението R_f съответствува определена стойност на честотата на въртене $n = n_{кр.}$, под която самовъзбудването е невъзможно. Тази честота на въртене се нарича критична.

8.1.2. Характеристика на празен ход

Характеристиката на празен ход на генератора с паралелно възбуждане $U_a = f(I_f)$ при $I_a = 0$ и $n = const$, може да бъде снета само в един квадрант (фиг.8.4). Тъй като I_f е малък, напрежението на изводите на генератора може да се приеме $U_a \approx E_a$, така че видът на х.п.х. е същият, както на генератора с независимо възбуждане.



Фиг.8.4.

Снемането на характеристиката се извършва с помощта на регулиращия реостат във възбудителната верига.

8.1.3. Характеристика на късо съединение

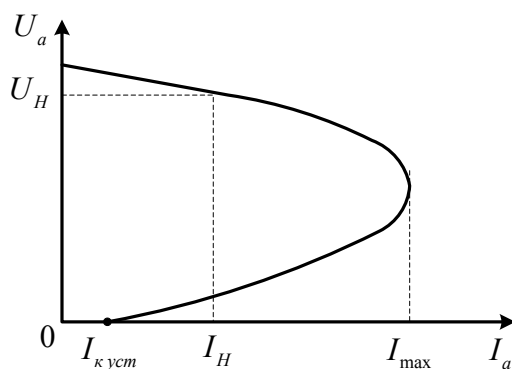
Характеристиката на късо съединение $I_a = I_k = f(I_f)$ при $U_a = 0$ и $n = const$ за генератора с паралелно възбуждане може да се снесе само като генератор с независимо възбуждане, тъй като при късо съединение и $U_a = 0$ самовъзбудването на генератора не е възможно.

8.1.4. Външна характеристика

Външната характеристика на генератора с паралелно възбуждане $U_a = f(I_a)$ се сменя при $R_f = const$ и $n = const$, т.е. без регулиране на възбудителния ток. Вследствие на това към двете причини, предизвикващи намаляване на напрежението при увеличаване на товара при генератора с независимо възбуждане (пад на напрежение в котвата и размагнитващото

действие на реакцията на котвата) тук се прибавя и трета причина – намаление на възбудителния ток $I_f = \frac{U_a}{R_f}$, който намалява с намалението на напрежението U_a , т.е. с увеличението на тока I_a . В резултат на това външната характеристика на генератора с паралелно възбуждане е по-бързо падаща, отколкото тази на генератора с независимо възбуждане. Поради това номиналното изменение на напрежението на генератора с паралелно възбуждане е по-голямо, като варира в границите $\Delta U_n \% = 10 \div 20 \%$.

Характерна особеност на външната характеристика на генератора с паралелно възбуждане е тази, че при увеличаване на товарния ток след достигане на определена стойност $I_a = I_{a\max}$ по-нататъшното намаление на товарното съпротивление не води до увеличение на тока, а напротив, токът и напрежението намаляват, характеристиката се обръща и достига до точка еквивалентна на установено късо съединение (фиг. 8.5).



Фиг.8.5.

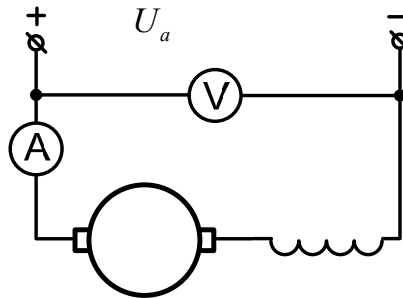
Тази особеност на характеристиката се обяснява със следното. При увеличение на товарния ток напрежението U_a намалява отначало бавно, а след това по-бързо, тъй като с намалението на напрежението намалява възбудителният ток, респективно - магнитният поток Φ_δ , а от там и е.д.н. E_a .

8.1.5. Товарна и регулационна характеристика

Товарната характеристика $U_a = f(I_f)$ при $I_a \neq 0 = const$ при $n = const$ и регулационната характеристика $I_f = f(I_a)$ при $U_a = const$ и $n = const$ на генератора с паралелно възбуждане почти не се отличават от същите характеристики на генератора с независимо възбуждане.

8.2. Генератор за постоянен ток с последователно възбудяване

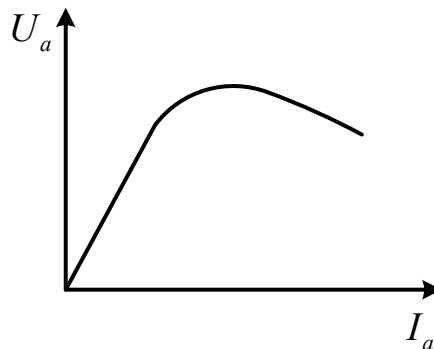
Генераторите за постоянен ток с последователно (сериен) възбудяване имат ограничено приложение и се използват само в специални схеми. Схемата на такъв генератор е показана на фиг.8.6. Генераторът работи със самовъзбудяване, като се възбужда от товарния ток $I_f = I_a$.



Фиг.8.6.

Характеристика на празен ход, характеристика на късо съединение, товарни характеристики и регулационна характеристика този генератор няма, тъй като възбудителният и товарният ток са един и същ. За да се изследват качествата на самата машина, тези характеристики могат да се снимат с отделяне на намотките и външно възбудяване. В този случай те имат вида, както в случая с независимо възбудяване.

Външната характеристика на генератора с последователно възбудяване $U_a = f(I_a)$ при $n = const$ е показана на фиг.8.7.

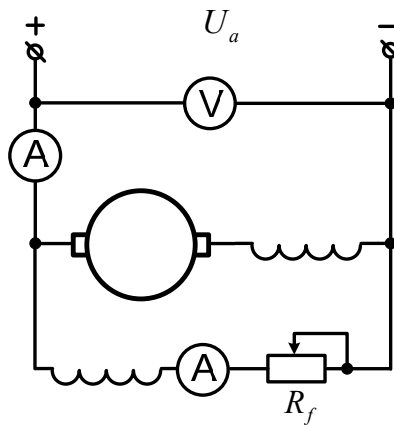


Фиг.8.7.

В областите на ниско натоварване поради ниските стойности на тока, който е и възбудителен, индуктираното е.д.н. е малко по стойност, респ. U_a също е ниско. С увеличаването на тока напрежението U_a нараства сравнително бързо до определена стойност. При по-големите стойности на тока след насищането на магнитната верига нарастването на е.д.н. е малко и не може да компенсира реакцията на котвата и пада на напрежение. Затова напрежението започва да намалява.

8.3. Генератор за постоянен ток със смесено възбуждане

Генераторите за постоянен ток със смесено (компаудно) възбуждане са генератори със самовъзбуждане и имат две възбудителни намотки, едната от които се включва паралелно, а другата последователно на котвената верига. Обикновено намотките се свързват така, че техните м.д.н. да се сумират (съпосочно свързване), а в много редки случаи те се свързват противоположно. В зависимост от съотношението на двете м.д.н. генераторът със смесено възбуждане се доближава по своите свойства към генератора с паралелно или към генератора с последователно възбуждане. Обикновено последователната намотка е с малко м.д.н. и се оразмерява по такъв начин, че да компенсира размагнитващото действие на реакцията на котвата и освен това да създава и известно положително м.д.н. при натоварване. Схемата на свързване е показана на фиг.8.8.



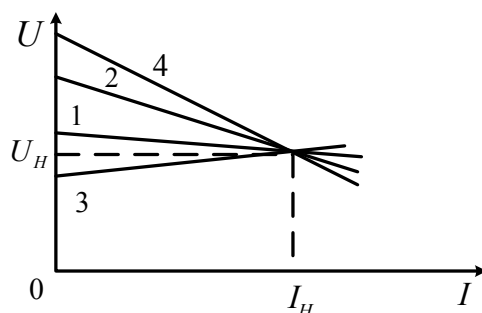
Фиг.8.8.

Характеристиката на празен ход на генератора със смесено възбуждане се снима, както при генератора с паралелно възбуждане и има същия вид. Характеристиката на късо съединение може да се снима само при външно захранване на възбудителната паралелна намотка и при насрещно свързване на последователната намотка, защото при съпосочно свързване ще протече много голям ток на късо съединение. Характеристиката има същия вид както на генератор с независимо възбуждане.

Вида на външната характеристика зависи от влиянието на последователната намотка. При съпосочно свързване, поради компенсиращата роля на последователната намотка, е възможно да се получи характеристика, при която в номинален режим и в режим на празен ход консуматорите да получават еднакво напрежение. Ако последователната намотка е с по-голяма индуктивност, може да се получи външна характеристика с нарастващ характер, т.е с натоварването напрежението да нараства. Този случай се нарича **прекомпаундиране** и е

подходящ за захранване на консуматори посредством електропровод, в който има пад на напрежение, т.е. потребителите да получават еднакво напрежение.

При противоположно свързване на намотките, последователната намотка действа размагнитващо и външната характеристика е с по-голям наклон в сравнение с паралелно възбуждане, т.е. силно зависи от товара.



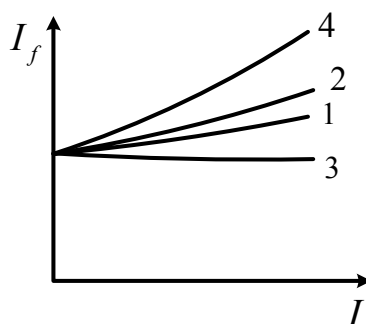
Фиг.8.9.

На фиг.8.9 са показани следните външни характеристики за сравнение.

- 1 - външна характеристика на генератор с независимо възбуждане;
- 2 - външна характеристика на генератор с паралелно възбуждане;
- 3 - външна характеристика на генератор със смесено възбуждане и съпосочно свързване на двете намотки;
- 4 - външна характеристика на генератор със смесено възбуждане и противоположно свързване на двете намотки.

Вида на регулационните характеристики е показан на фиг.8.10:

- 1 - регулационна характеристика на генератор с независимо възбуждане;
- 2 - регулационна характеристика на генератор с паралелно възбуждане;
- 3 - регулационна характеристика на генератор със смесено възбуждане и съпосочно свързване на двете намотки;
- 4 - регулационна характеристика на генератор със смесено възбуждане и противоположно свързване на двете намотки.



Фиг.8.10.

Генераторите със смесено възбуждане могат да се използват във всички случаи, посочени за генераторите с паралелно възбуждане, особено в случаите с високи изисквания по отношение на външната характеристика.

Въпрос 9

Основно уравнение на напрежението. Енергетична диаграма. Електромагнитен момент на ПТГ

9.1. Основно уравнение на напрежението. Енергетична диаграма

Основното уравнение на напрежението на генератора, независимо от начина на възбуждане, се определя от втори закон на Кирхоф, описващ равновесието на напреженията в котвения контур и има вида:

$$U_a = E_a - I_a r_a - 2\Delta U_q, \quad (9.1)$$

където:

U_a - напрежението на изводите на генератора;

E_a - индуктираното в котвата е.д.н.;

I_a - котвен ток на машината;

r_a - съпротивлението на котвената верига;

ΔU_q - падът на напрежение в четковия контакт.

Най-често $I_a r_a$ и $2\Delta U_q$ се обединяват, като се приема, че ΔU_q се изменя пропорционално на тока I_a . При това допускане (9.1) добива вида

$$U_a = E_a - I_a R_a, \quad (9.2)$$

където:

$R_a = r_a + \frac{2\Delta U_q}{I_a}$ - общо котвено съпротивление.

Ако двете страни на (9.1) се умножат с I_a , се получава уравнението за мощностите на генератора

$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 r_a - 2\Delta U_q I_a, \quad (9.3)$$

или

$$P_2 = P_\delta - p_{ел.а} - p_{ел.ч}, \quad (9.4)$$

където:

$P_2 = U_a I_a$ - полезна мощност отдавана от генератора;

$P_\delta = E_a I_a$ - електромагнитна мощност на генератора;

$p_{ел.а}$ - електрически загуби на мощност в котвената верига на генератора;

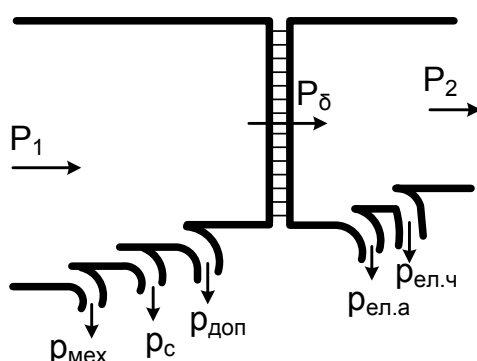
$p_{ел.ч}$ - електрически загуби на мощност в четковия контакт.

От (9.4) следва, че механичната мощност, която развива първичният двигател P_1 , задвижващ генератора, се преобразува в електромагнитна, която намалена със загубите в котвената верига и четковия контакт, се отдава от генератора към външната мрежа.

При работа на генератора са налице и механични загуби вследствие на триенето в лагерите - $p_{мех.}$, загуби в стоманата на котвата p_c , както и допълнителни загуби $p_{доп.}$, свързани с въртенето на котвата (напр. от самовентилация). Тези загуби се покриват от механичната мощност на първичния двигател. Следователно, пълната механична мощност на първичния двигател е следната

$$P_1 = P_2 + p_{ел.а} + p_{ел.ч} + p_{мех.} + p_c + p_{доп.} = P_\delta + p_{мех.} + p_c + p_{доп.} \quad (9.5)$$

На уравнение (9.5) отговаря енергетичната диаграма, показана на фиг.9.1.



Фиг.9.1.

9.2.Електромагнитен момент на ПТГ

Ако всички членове на (9.5) се разделят на ъгловата скорост $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, ще се получи уравнението за моментите в установен режим на работа

$$M_1 = M_\delta + M_0, \quad (9.6)$$

където:

$M_1 = \frac{P_1}{\omega}$ - момент на първичния двигател, приложен на вала на генератора;

$M_{\delta} = \frac{P_{\delta}}{\omega}$ - електромагнитен съпротивителен момент, развиван от генератора;

$M_0 = M_{\text{мех.}} + M_c + M_{\text{доп}} = \frac{P_{\text{мех.}} + P_c + P_{\text{доп.}}}{\omega}$ - моментът, който съответства на загубите от триене, загубите в стоманата и допълнителните загуби, които се покриват от механичната мощност на първичния двигател.

При възникване на преходен процес, свързан с изменението на ъгловата скорост, възниква т.нар. динамичен момент

$$M_{\text{дин.}} = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (9.7)$$

където:

J - инерционен момент на въртящите се части на генератора.

Динамичният момент съответства на изменението на кинетичната енергия на въртящите се маси. При увеличаване на скоростта $M_{\text{дин.}} > 0$ и действа спирачно. При намаляване на скоростта $M_{\text{дин.}} < 0$ и действа като двигателен момент. Следователно за уравнението за момента на първичния двигател може да се запише

$$M_1 = M_{\delta} + M_0 + M_{\text{дин.}}. \quad (9.8)$$

Въпрос 10

Постояннотоков двигател (ПТД). Видове. Енергетична диаграма. ПТД с независимо и шунтово възбуждане, характеристики. Пускане в ход на ПТД

10.1. Постояннотоков двигател (ПТД). Видове. Енергетична диаграма

Постояннотоковите двигатели намират широко приложение в бита и промишлеността. Причината за това е, че те дават възможността за плавно и икономично регулиране на честотата на въртене в широки граници. В зависимост от начина на възбуждане тези двигатели се разделят аналогично на генераторите за постоянен ток:

- двигатели с независимо възбуждане;
- двигатели с паралелно (шунтово) възбуждане;
- двигатели с последователно (серийно) възбуждане;
- двигатели смесено (компаудно) възбуждане.

Основното уравнение, даващо електрическото равновесие на котвения контур в установен режим на работа, има следният вид:

$$U_a = I_a R_a + E_a, \quad (10.1)$$

откъдето

$$I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a}. \quad (10.2)$$

Ако умножим почленно израза (10.1) с тока I_a се получава

$$U_a I_a = I_a^2 R_a + E_a I_a, \quad (10.3)$$

където:

$U_a I_a = P_1$ - мощността, която двигателят получава от мрежата;

$I_a^2 R_a = p_{ел.}$ - електрическите загуби в котвената верига;

$E_a I_a = P_\delta$ - електромагнитната мощност развивана от двигателя.

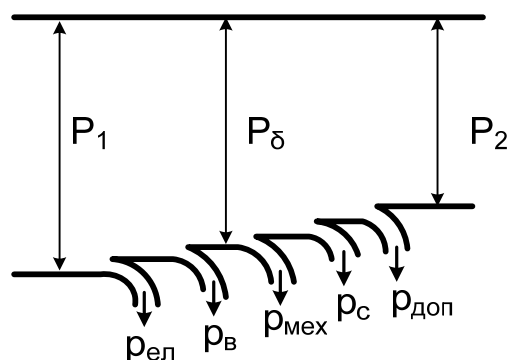
Като се вземе предвид, че механичните загуби $p_{мех.}$, загубите в стоманата на котвата p_c и допълнителните загуби $p_{доп}$ се покриват от мощността, която двигателят получава от мрежата, покриваща и необходимата мощност за възбуждането p_δ , то за пълния енергиен баланс може да се запише:

$$P_1 - p_{ел.} - p_\delta - p_{мех.} - p_c - p_{доп} = P_\delta - p_{мех.} - p_c - p_{доп} = P_2, \quad (10.4)$$

където:

P_2 - полезна механична мощност на вала на двигателя.

На уравнение (10.4) съответства енергетичната диаграма показана на фиг.10.1.



Фиг.10.1.

Електромагнитният момент, развиван от двигателя, е

$$M = \frac{P_\delta}{\omega}. \quad (10.5)$$

Въртящият момент на вала на двигателя $M_{\text{дв}}$ се получава, като от електромагнитния момент извадим момента обусловен от загубите:

$$M_{\text{дв}} = M - M_0. \quad (10.6)$$

където:

$M_0 = \frac{P_{\text{мех}} + P_c + P_{\text{дон}}}{\omega}$ - съпротивителен момент, който съответства на загубите.

Въртящият момент на вала и приложения съпротивителен въртящ момент M_c са свързани със следната зависимост:

$$M_{\text{дв}} - M_c = M_{\text{дин}}. \quad (10.7)$$

където:

$M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ - динамичен момент, възникващ по време на преходен процес свързан с изменение на скоростта на въртене;
 J - сумарен инерционен момент.

При постоянна честота на въртене, двигателният момент уравнисява съпротивителния:

$$M_{\text{дв}} = M_c. \quad (10.8)$$

При анализа на работата на постояннотоковите машини в установен режим е от съществено значение да се установи връзката между въртящия момент и ъгловата скорост при определени стойности на напрежението на котвата U_a , магнитния поток Φ , и параметрите на машината. За анализа се започва с уравнение (9.1), като се вземе предвид, че $E_a = c_E \Phi n$, след заместване, уравнение (10.1) добива следния вид

$$U_a = I_a R_a + c_E \Phi n, \quad (10.9)$$

откъдето се определя израз за ъгловата скорост, т.нар. електромеханична (скоростна) характеристика $\omega = f(I_a)$

$$n = \frac{U_a}{c_E \Phi} - \frac{I_a R_a}{c_E \Phi}. \quad (10.10)$$

Електромагнитният момент на електродвигателя може да се изрази посредством котвения ток и магнитния поток на машината

$$M = c_M \Phi I_a, \quad (10.11)$$

и съответно

$$I_a = \frac{M}{c_M \Phi}. \quad (10.12)$$

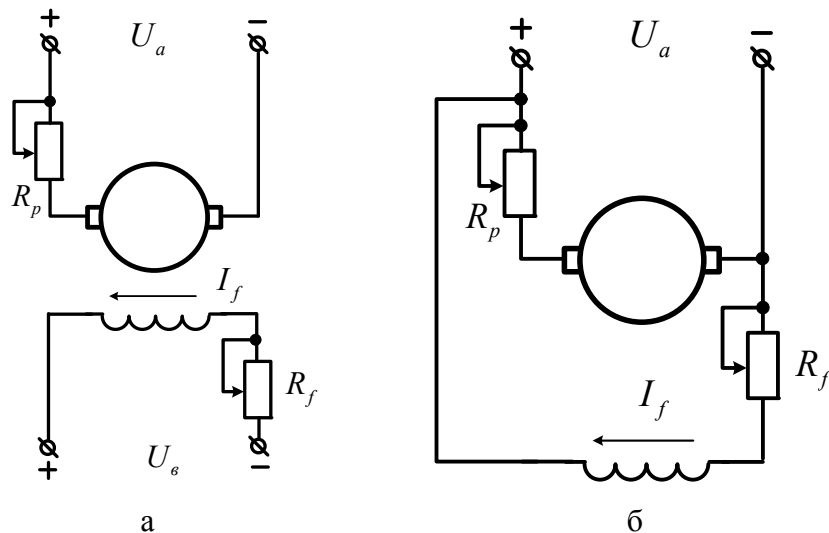
Като се замести (10.12) в (10.10) се получава изразът за механичната характеристика (при пренебрегване на момента на загубите) $n = f(M)$

$$n = \frac{U_a}{c_E \Phi} - \frac{MR_a}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (10.13)$$

Характеристиките на двигателя, когато той е без включено външно съпротивление и без отслабване на магнитното поле при номинално напрежение, се наричат естествени. Характеристиките при включване на външно съпротивление в котвата, при изменение на магнитния поток или при изменение на напрежението, се наричат изкуствени. От (10.13) се вижда, че механичните характеристики силно зависят от магнитния поток. Следователно за различните видове възбуждане механичните характеристики ще имат различен характер.

10.2. Двигатели за постоянен ток с независимо и с паралелно възбуждане

Характерна особеност за тези двигатели е тази, че възбудителният ток I_f не зависи от котвения I_a . При независимо възбуждане възбудителната намотка е захранена от независим източник, а при паралелно възбуждане е включена паралелно на котвата и по същество нейното захранване е независимо. Поради това постоянно-токовият двигател с независимо възбуждане и двигателят с паралелно възбуждане имат еднакви свойства и характеристики. Схемите на свързване на двигател с независимо и с паралелно възбуждане са показани съответно на фиг. 10.2а и б.



Фиг.10.2.

Основните характеристики, които определят свойствата на двигателите с независимо и паралелно възбуждане, са електромеханичната (скоростна) характеристика

$$n = f(I_a) \text{ при } U_a = const \text{ и } I_f = const, \quad (10.14)$$

и механичната характеристика

$$n = f(M) \text{ при } U_a = const \text{ и } I_f = const. \quad (10.15)$$

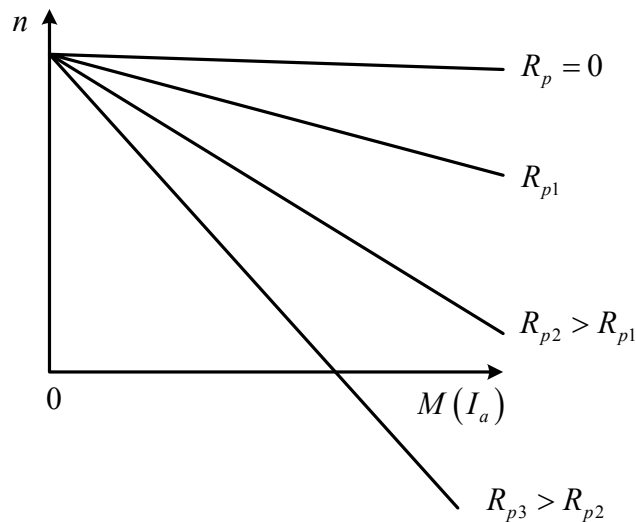
В общия случай, когато в котвената верига има включен реостат, тези характеристики имат следния запис, за електромеханичната

$$n = \frac{U_a}{c_E \Phi} - \frac{I_a (R_a + R_p)}{c_E \Phi} \quad (10.16)$$

и за механичната характеристика

$$n = \frac{U_a}{c_E \Phi} - \frac{M (R_a + R_p)}{c_E c_M \Phi^2}. \quad (10.17)$$

При константен възбудителен ток, ако се пренебрегне реакцията на котвата, магнитният поток може да се приеме за постоянен. В такъв случай в съответствие с (10.16) и (10.17) електромеханичните и механичните характеристики ще представляват прави линии, чиито наклон зависи от $R_a + R_p$. Тези характеристики са показани на фиг.10.3.



Фиг.10.3.

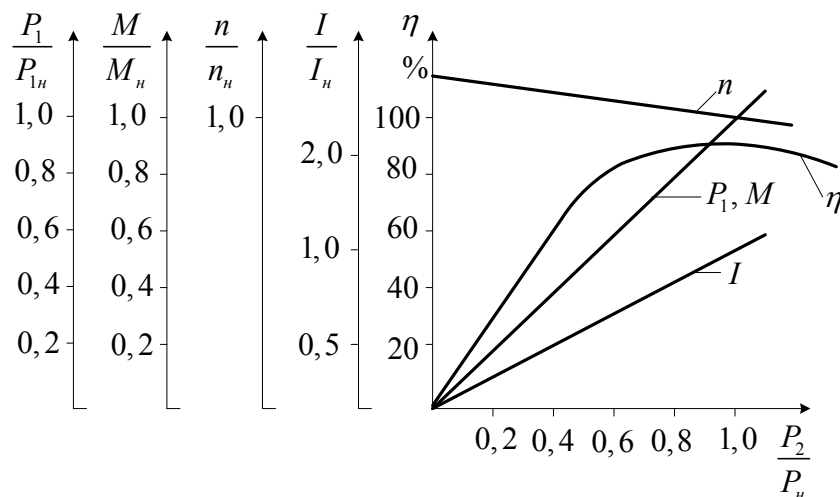
При включване на различни по големина съпротивления се получават серия от характеристики, които са по-меки. Това обаче се постига за сметка на увеличаването на загубите в регулиращото съпротивление. Тези характеристики пресичат абцисата в точки, които съответствуват на котвен ток

$$I_a = \frac{U_a}{R_a + R_p}. \quad (10.18)$$

От тук се вижда, че за да бъде този ток близък до номиналния, регулиращото съпротивление R_p трябва да бъде многократно по-голямо от котвеното.

Регулировъчният реостат R_{pf} във веригата на възбудителната намотка дава възможност да се изменя възбудителният ток I_f , съответно магнитният поток Φ . Както се вижда от (10.16) и (10.17) по този начин може да се изменя честотата на въртене на двигателя.

На фиг.10.4 са показани работните характеристики на двигателите с независимо и с паралелно възбуждане. Те представляват зависимостта на входящата мощност P_1 , тока I_a , честотата на въртене n , момента M и к.п.д. η в зависимост от полезната мощност P_2 на вала на двигателя при $U_a = const$ и $I_f = const$. Характеристиките са построени спрямо номиналните стойности на величините.



Фиг.10.4.

Характеристиките $n = f(P_2)$ и $M = f(P_2)$, както следва от направения анализ, са прави линии. Останалите зависимости имат характер, еднакъв за всички двигатели за постоянен ток.

10.3. Пускане в ход на ПТД

При пускане на постояннооточковите двигатели трябва да се осигурят следните условия:

- да се осигури достатъчно голям пусков момент и условия за развъртане на двигателя до необходимата честота на въртене;
- да не се допуска протичането на голям пусков ток, опасен както за колекторно-четковия апарат, така и за котвената намотка.

Тези изисквания могат да бъдат удовлетворени по различни начини. На практика двигателите за постоянен ток се пускат по три начина: директно, с понижено напрежение и с пусков реостат. От (10.2) се вижда, че в момента на включването при $n = 0$ и $E_a = 0$, следователно пусковият ток се ограничава само от активното съпротивление на котвата

$$I_{an} = \frac{U_a}{R_a} = (10 \div 50) I_{an}. \quad (10.19)$$

Това означава, че при директно включване пусковите токове са много големи и е удачно само за двигатели с малка мощност, на които R_a е сравнително голямо.

При машините с по-голяма мощност може да се използва източник на регулируемо постоянно напрежение и двигателят да се пусне на понижено напрежение, което плавно да се повишава до достигане на необходимата честота на въртене.

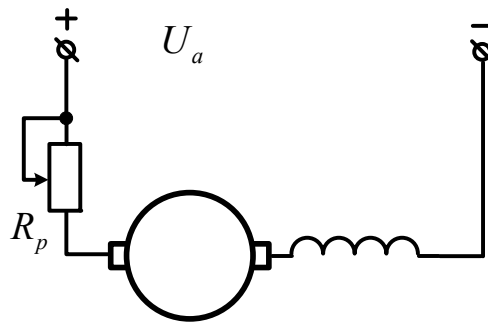
Ако не се разполага с такъв източник, в котвената верига може да се включи реостат, който да ограничи пусковия ток, след което плавно да се намалее стойността на съпротивлението до пълното му шунтиране.

Въпрос 11

ПТД с последователно и смесено възбуждане. Характеристики. Пускане в ход

11.1. Двигател с последователно възбуждане

В двигателите с последователно възбуждане котвеният ток е едновременно и възбудителен $I_a = I_f$. Поради тази причина при работа на машината нейният магнитен поток Φ се изменя в широки граници. Схемата на включване на този тип двигател е показана на фиг.1.11.



Фиг.11.1.

Ако се пренебрегне насищането, резултантния магнитен поток Φ при натоварване може да се счита за пропорционален на тока I_a :

$$\Phi = k_{\Phi} I_a. \quad (11.1)$$

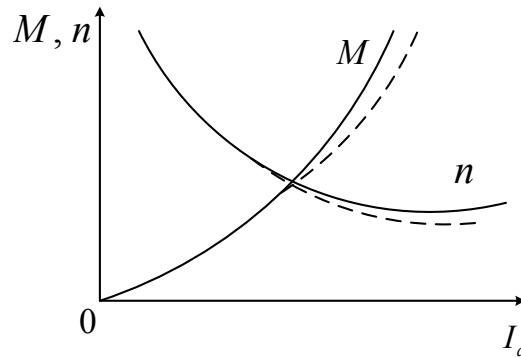
В най-общ случай последователно на котвата се включва регулиращ реостат и като се вземе предвид (11.1), скоростната характеристика добива вида

$$n = \frac{U_a}{c_E k_{\Phi} I_a} - \frac{R_a + R_p}{c_E k_{\Phi}}. \quad (11.2)$$

Електромагнитният момент на двигателя с последователно възбуждане е

$$M = c_M \Phi I_a = c_M k_{\Phi} I_a^2. \quad (11.3)$$

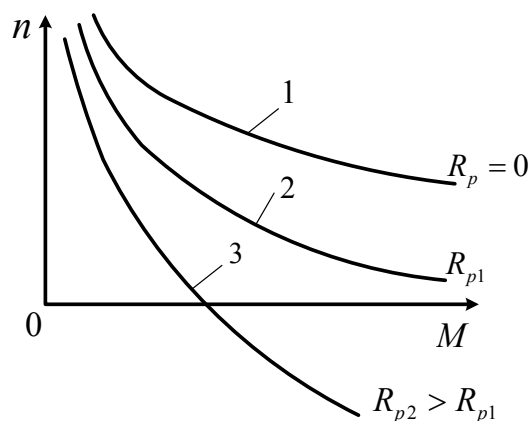
На фиг.11.2. са показани скоростната - $n = f(I_a)$ и моментната - $M = f(I_a)$ характеристики на двигателя. Вследствие на насищането на магнитната верига и нарушаването на пропорционалността между тока и магнитния поток, експериментално снетите характеристики (с плътна линия) и изчислените (с прекъсвана линия) се различават.



Фиг.11.2.

Както се вижда от фиг.11.2. скоростната характеристика на двигателя с последователно възбуждане има хиперболичен характер. При намаляване на тока скоростта се увеличава и теоретично клони към безкрайност. Поради това двигателите с последователно възбуждане не се допускат да работят на празен ход, както и да се използва ремъчна предавка към задвижвания механизъм. Обикновено свързването става чрез съединител или зъбна предавка.

На фиг.11.3. са показани механичните характеристики на двигателя за постоянен ток с последователно възбуждане. Освен естествената характеристика 1 посредством включване в котвената верига на регулиращ реостат с различни по големина съпротивления R_p се получава серия от изкуствени характеристики 2, 3. По този начин при даден съпротивителен момент $M_c = const$ може да се регулира честотата на въртене. Това обаче е свързано със значителни загуби на енергия в регулиращия реостат.



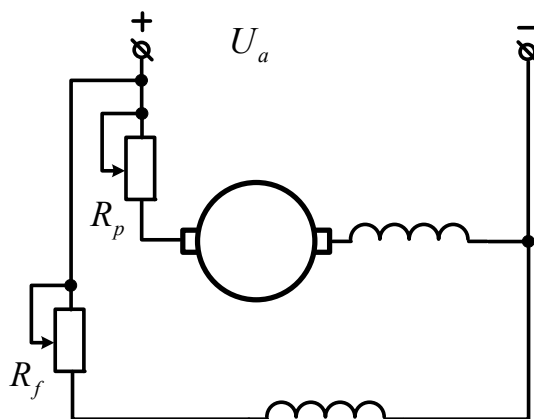
Фиг.11.3.

В меката механична характеристика на двигателя с последователно възбуждане честотата на въртене е обратно пропорционална на \sqrt{M} . Това означава, че при изменение на съпротивителния момент в широки граници, мощността P_2 (съответно P_1), както и токът на двигателите с последователно възбуждане се изменят в по-тесни граници, отколкото при двигателите с паралелно възбуждане. Във връзка с това те по-леко поемат претоварвания.

От (11.3) се вижда, че моментът на двигателя зависи от квадрата на тока. При пускане $I_a = (1,5 \div 2)I_n$, от където следва, че този двигател се характеризира с голям пусков момент. Това е голямо предимство на двигателя с последователно възбуждане в случаите, когато са налице тежки пускови условия и изменение на товарния момент в широки граници.

11.2. Двигател за постоянен ток със смесено възбуждане

Схемата на двигател със смесено възбуждане е показана на фиг.11.4.

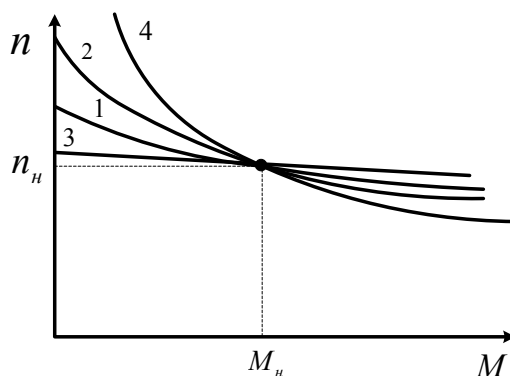


Фиг.11.4.

Магнитният поток на този двигател се възбужда от едновременното действие на двете възбудителни намотки - паралелната и последователната. При това е възможно включването на тези намотки така, че техните м.д.н. да бъдат съпосочни или противоположни. Реакцията на котвата също оказва влияние върху резултантния магнитен поток.

При противоположно включване на двете намотки с увеличението на товара магнитният поток намалява. Това води до увеличаване на честотата на въртене, вследствие на което работата на двигателя може да се окаже неустойчива. Ето защо такова включване не се използва.

При съпосочно включване с увеличаване на товара магнитният поток нараства. Поради това механичните характеристики (фиг.11.5. криви 1 и 2) се разполагат между характеристиките с паралелно възбуждане (права 3) и с последователно възбуждане (крива 4)



Фиг.11.5.

Двигателите със смесено възбуждане освен в задвижванията, които изискват бързи ускорения при пускане и допустими значителни изменения на честотата на въртене при изменение на товара, се използват широко в електротранспорта. С тях е възможна работата в рекуперативен режим, т.е. да се осъществява връщане на енергия в захранващата мрежа.

11.3. Пускане в ход

Пускането в ход на двигателите за постоянен ток с последователно и смесено възбуждане се осъществява по аналогичен начин, както на двигателите с независимо и паралелно възбуждане. Може да се използва пусков реостат или двигателят да се захранва от регулируем източник на постоянно напрежение. Двигателите с малка мощност могат да се включват директно при номинална стойност на захранващото напрежение.

Въпрос 12

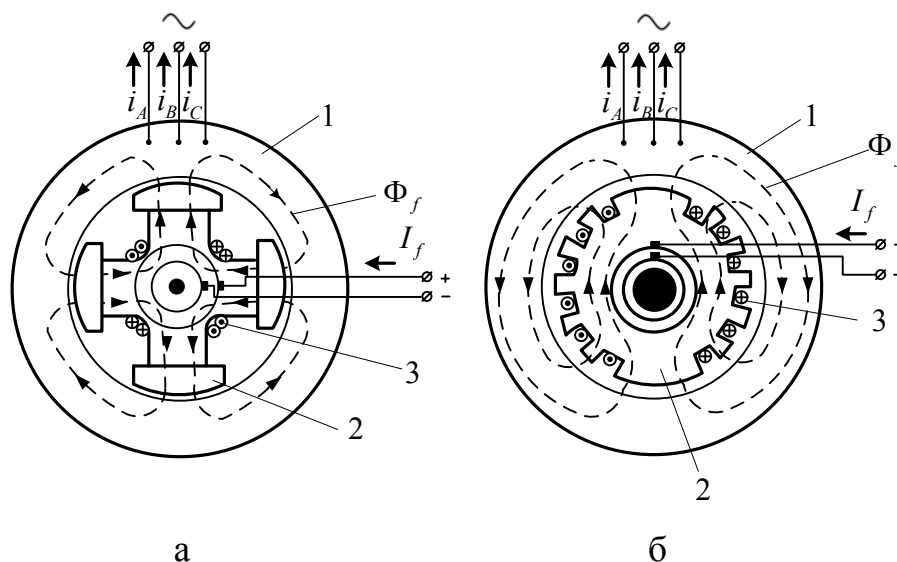
Устройство и принцип на действие на синхронните машини (СМ)

12.1. Общи сведения

Синхронната машина е променливотокова машина, на която роторът има същата скорост и посока на въртене, както и въртящото се магнитно поле, възбудено от токовете на статорната намотка независимо от товара ѝ.

Работата на синхронната машина се основава на електромагнитното взаимодействие на магнитно поле, възбудено от променлив ток в многофазна намотка и магнитното поле, възбудено от постоянен ток, протичащ във възбудителната намотка.

Многофазната намотка се разполага в статора. Най-често е симетрична трифазна намотка и в по-редки случаи е еднофазна, двуфазна или m -фазна. Статорът на синхронната машина има същото принципно устройство както статорът на асинхронната машина, нарича се също така котва. През възбудителната намотка, която се намира в ротора, протича постоянен ток, който създава възбудителния магнитен поток. Въртящата се възбудителна намотка се свързва с източника на постоянен ток най-често посредством контактни пръстени и четки. Роторът с възбудителната намотка и полюсната система се нарича индуктор. В някои случаи се използват постоянни магнити. В зависимост от конструкцията на ротора синхронните машини се делят на явнополюсни и неявнополюсни (фиг.12.1а и фиг.12.1б).



1 – статор (котва); 2 - ротор (индуктор); 3 - възбудителна намотка

Фиг.12.1.

Синхронната машина работи като генератор, когато се задвижва от първичен двигател и отдава електрическа енергия в електрическа мрежа.

Възбуденият магнитен поток на индуктора се върти с честота на въртене n спрямо статора и индутира в неподвижната променливотокова статорна намотка напрежение с честота

$$f = \frac{n \cdot p}{60}, \quad (12.1)$$

където:

n - честота на въртене [об/мин];

p - брой двойки полюси.

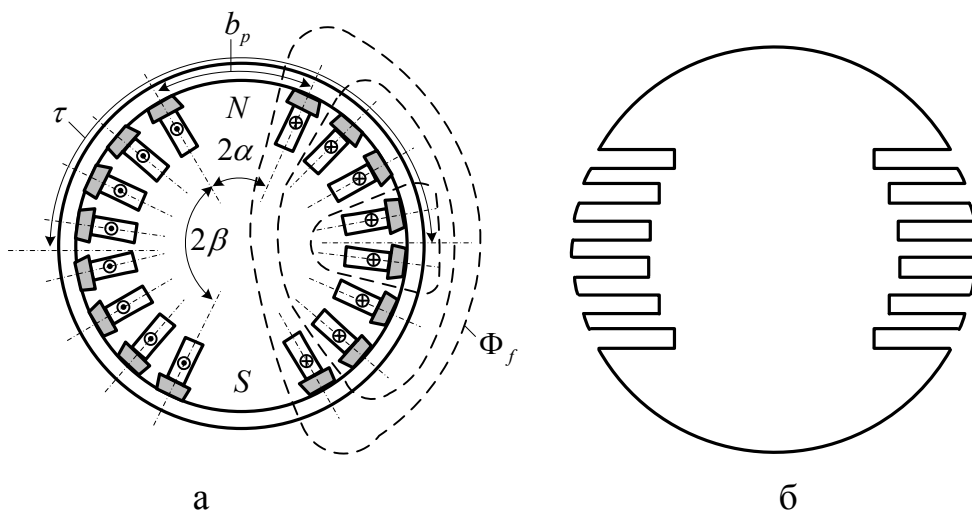
Е.д.н. на статорните фази образуват симетрична система напрежения (когато статорната намотка е симетрична тифазна). Ако към статорните намотки се включи симетричен товар, през нея протича симетрична система токове и генератора отдава електрическа енергия на товара. Трифазната система токове възбужда въртящо се магнитно поле, което има същата посока и скорост на въртене като на индуктора. Статорното и роторното магнитно поле се въртят синхронно и образуват резултантното магнитно поле на машината. Тъй като резултантното магнитно поле и роторът се въртят с една и съща скорост, то в ротора не се индутира е.д.н.

Синхронната машина е обратима и може да работи като двигател, като преобразува електрическата енергия в механична. В такъв случай статорната намотка се захранва от електрическата мрежа. Променливият ток, който протича през нея, взаимодейства с полето на възбудения ротор и се образува електромагнитен момент.

12.2. Неявнополюсни синхронни машини

Неявнополюсните синхронни генератори - турбогенераторите са с хоризонтален вал. Най-отговорната в механично и топлинно отношение е роторът. Това е масивно цилиндрично тяло, изработено от специална (хром - молибденова) кована стомана с много добри механични и магнитни свойства, и трябва да бъде динамично балансиран. Това тяло се подлага на механична и термична обработка за отстраняване на вътрешните напрежения при неговото изковаване.

В ротора се фрезват канали, в които се влагат секциите на възбудителната намотка. Приблизително 1/3 от полюсното деление е без канали и представлява т.нар. голям зъб на индуктора. В зависимост от разположението на каналите се изработват два вида ротори: с радиални канали и с тангенциални канали (фиг.12.2а и фиг.12.2б).



τ - полюсно деление; b_p - широчина на полюса (големия зъб); Φ_f - поток от възбудителната намотка

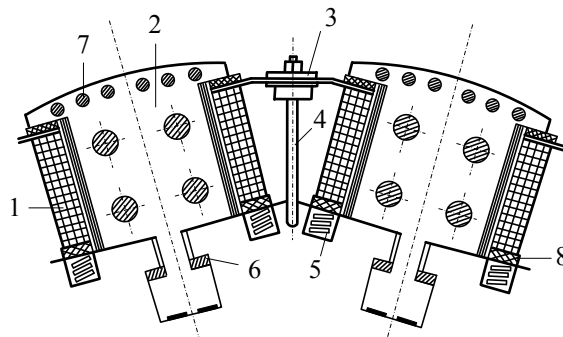
Фиг.12.2.

Роторната възбудителна намотка, изработена от меден проводник, се състои от концентрични секции, които имат по няколко навивки. Конструкцията на секциите зависи от начина на охлаждане на възбудителната намотка.

Тялото (корпусът) на синхронния турбогенератор е затворена конструкция, която трябва да има определена якост, а при специално охлаждане (напр. водород) и газонепроницаемост. За намаляване на вибрациите, тялото се поставя върху фундамента върху елестична подложка.

12.3. Явнополюсни синхронни машини

При бавно въртящите се синхронни машини $n \leq 1500$ об/мин. полюсите на индуктора са отделени конструктивно - „явноизразени” и са монтирани върху венца на ротора (фиг.12.3).



1 - възбудителна намотка; 2 - полюсно тяло с полюсен накрайник и Т-образна лястовича опашка; 3 - връзки между отделните бобини; 4 - шпилка; 5 - пружини за притискане на бобините; 6 - клинове към лястовичата опашка; 7 - успокоителна намотка; 8 - венец на ротора.

Фиг. 12.3.

Телата на полюсите на явнополюсните машини са събрани от листовата стомана и са стегнати с шпилки. В синхронните машини със средна и голяма мощност полюсите се закрепват към венеца на ротора чрез лястовичи опашки. В малките машини се закрепват с болтове. В полюсните накрайници на синхронните генератори в канали, щанцовани по периферията, се поставят масивните проводници на успокоителната намотка (демпферна намотка). Тази намотка е близка по конструкция на кафезната роторна намотка на асинхронните двигатели. В синхронните двигатели тя се нарича пускова и служи за асинхронното им пускане. По-голямата част от синхронните машини с честота на въртене $n > 250$ об/мин. се изработват с хоризонтален вал. Мощните хидрогенератори с ниски честоти на въртене се изработват с вертикален вал. Размерите на ротора се ограничават от неговата прериферна скорост.

Въпрос 13

Взаимодействие между магнитните полета на индуктора и котвата, изразени чрез пространствени вектори

При работа на синхронен трифазен генератор под товар, който се характеризира със стойностите на тока I , честотата f и фактора на мощността $\cos \varphi$, през статорната намотка протича трифазен променлив ток, възбуждащ въртящото се магнитно поле на котвата. То влиза във взаимодействие с полето на индуктора, при което се образува резултантното магнитно поле на синхронната машина

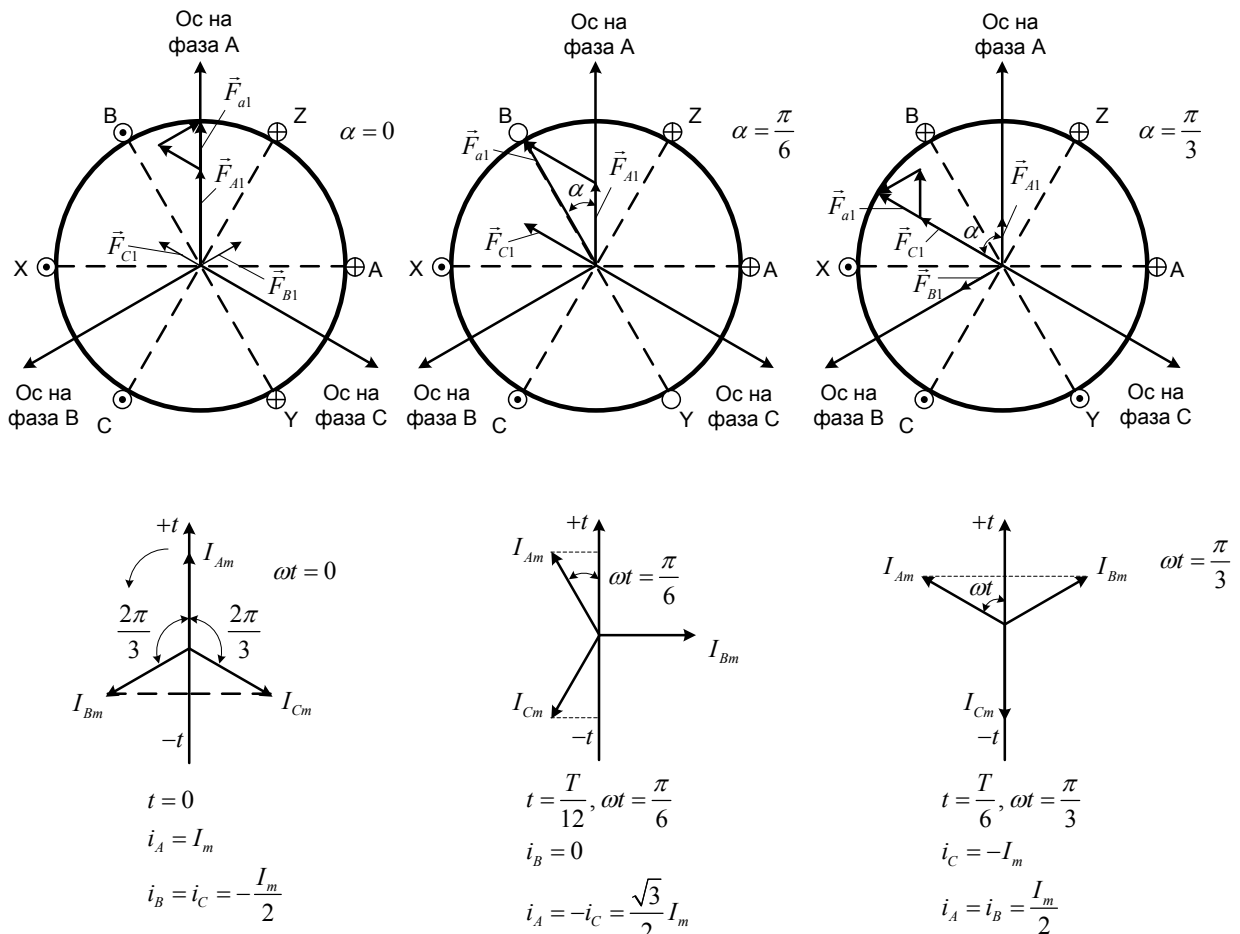
Процесът на взаимодействие между полетата (респ. създаващите ги м.д.н.) на роторната и статорната намотка се нарича реакция на тока на котвата на синхронната машина или накратко реакция на котвата.

Анализът на реакцията на котвата е един от най-сложните проблеми, който се поставя при разглеждане на работата на синхронните машини. Едната трудност се явява, когато трябва да се съберат полетата, създадени от променлив и постоянен ток и това трябва да се отрази в пространствената диаграма на векторите на м.д.н. Тази трудност обаче се преодолява поради това, че основните хармоници на полето на индуктора и котвата се въртят с еднаква ъглова скорост. При всеки един товар въртящите се пространствени вълни на тези две полета са взаимно неподвижни по между си и между тях се сключва постоянен ъгъл.

Взаимодействието между магнитните полета на котвата и индуктора се разглежда при двуполусна трифазна синхронна машина с концентрирана намотка и неявнополюсен ротор. Поради равномерната въздушната междина полетата са пропорционални на създаващите ги м.д.н. Следователно може да се разгледа взаимодействието на м.д.н. на двете намотки, изразени чрез пространствени вектори, отнесени към центъра на

синхронната машина. (Приема се, че съществуват само основните хармоници на м.д.н.)

На фиг.13.1 а, б и в са показани няколко различни пространствени положения на м.д.н. на статора, отговарящи на различните моментни стойности на фазните токове. Прието е положителният ток в дадена фаза да се изразява с \otimes в началото на фазата и с \ominus в края на фазата. При такова разположение на осите на фазните намотки има съответствие между диаграмите във временната равнина, където се изразяват временните величини: токове, е.д.н., напрежения и пълни магнитни потоци и диаграмите в пространствената равнина, където се изразяват пространствено-временните величини: м.д.н., потоци. Получава се еднаква посока на въртене на величините във временната и пространствената равнина. Посоката на правовъртящите се величини е обратна на движението на часовниковата стрелка.



Фиг.13.1.

На фиг.13.1 означенията са следните: I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm} - максимални стойности на фазните токове; $t-t$ - ос на моментните стойности; α - ъгъл сключен между оста на фаза A и вектора на резултантното м.д.н. \vec{F}_{a1} ; $A-X$

- начало - край на фаза A ; $B-Y$ - начало - край на фаза B ; $C-Z$ - начало - край на фаза C ;

T - период на променливия ток.

Векторите на фазните м.д.н. са разположени по осите на съответните фази, а техните големина са пропорционални на моментните стойности на фазните токове. Резултантното статорно м.д.н. \vec{F}_{a1} е векторната сума на трите фазни вектора:

$$\vec{F}_{a1} = \vec{F}_{A1} + \vec{F}_{B1} + \vec{F}_{C1}. \quad (13.1)$$

От анализа, който може да се направи съгласно с фиг.13.1, се вижда, че резултантното м.д.н. \vec{F}_{a1} има постоянна големина и съвпада с оста на тази фаза, чийто ток е максимален и с равнината на фазата, чийто ток в дадения момент t има нулева стойност. Освен това \vec{F}_{a1} е въртящ се вектор, който има ъглова скорост $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$. При двуполусна машина ($p=1$) ъгловата скорост на \vec{F}_{a1} е равна на кръговата честота на тока $\omega = 2\pi f$.

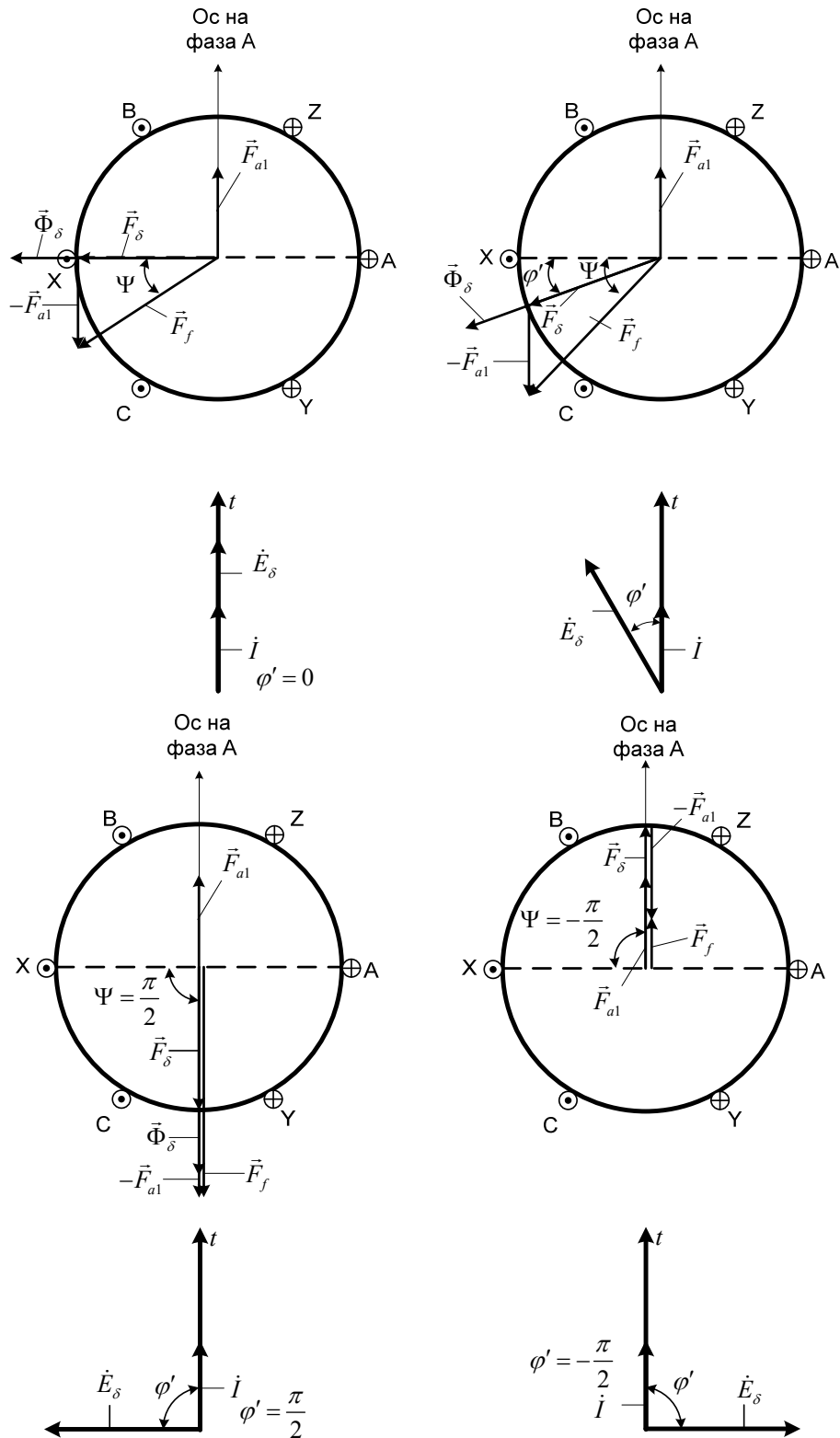
Дотук се разглежда само м.д.н. на котвената намотка \vec{F}_{a1} , като се смята, че възбудителната намотка е отворена, а статорната намотка е включена към мрежата и протичат токовете i_A , i_B , i_C . Ако през възбудителната намотка протече постоянен ток I_f , а статорната намотка е отворена, в синхронната машина се създава магнитно поле от възбудителната намотка (магнитно поле на възбуждането). При въртенето на ротора с постоянна ъглова скорост ω в статорната намотка се индукира е.д.н. с честота $f = \frac{p\omega}{2\pi}$ и синхронната машина работи на празен ход. М.д.н. на възбудителната намотка е \vec{F}_f , а неговият основен хармоник е \vec{F}_{f1} .

При възбуден и натоварен синхронен генератор протичат токове във възбудителната и в котвената намотка, които създават м.д.н. \vec{F}_{f1} и \vec{F}_{a1} , въртящи се с еднакви ъглови скорости. Те образуват резултантното м.д.н. \vec{F}_δ на синхронния генератор, което възбужда резултантното или действителното магнитно поле при натоварване на генератора. Следователно за пространствените вектори на м.д.н. може да се запише

$$\vec{F}_{a1} + \vec{F}_{f1} = \vec{F}_\delta. \quad (13.2)$$

На фиг.13.2. са показани няколко случая на разположение на пространствените вектори на м.д.н. в зависимост от характера на товара (активен, индуктивен, капацитивен) за двуполусен синхронен генератор. Посоката на вектора на резултантния магнитен поток $\vec{\Phi}_\delta$ съвпада с посоката

на резултатното м.д.н. \vec{F}_δ . Този поток индуцира в статорната намотка действителното е.д.н. E_δ . При анализа се пренебрегват падовете на напрежение в котвената намотка.



Фиг.13.2.

Приема се, че в четирите разглеждани случая токът във фаза A има максимална стойност. Следователно м.д.н. на реакцията на котвата \vec{F}_{a1} ще бъде константен по големина вектор насочен по оста на фаза A . Приема се, че резултантният магнитен поток $\vec{\Phi}_\delta$, а следователно и резултантното м.д.н. \vec{F}_δ са с еднаква големина в отделните случаи, тъй като $E_\delta \approx U = const$. Тогава при известни \vec{F}_{a1} и \vec{F}_δ може да се определи големината и посоката на м.д.н. на възбудяването чрез равенството

$$\vec{F}_f = \vec{F}_\delta - \vec{F}_{a1}. \quad (13.3)$$

При чисто активен товар (фиг.13.2 а) токът I и е.д.н. \dot{E}_δ не са дефазирани. Следователно е.д.н. на фаза A ще има максимална стойност. Това е възможно ако в този момент потокът $\vec{\Phi}_\delta$ и резултантното м.д.н. \vec{F}_δ съвпадат с равнината на фаза A (на фигурата с правата $A-X$). Нанася се векторът \vec{F}_δ по правата $A-X$ с посока към страната X . След което по равенство (13.3) се определя \vec{F}_f . М.д.н. на възбудителната намотка сключва ъгъл ψ с равнината на фаза A

При активно-индуктивен характер на товара токът във всяка фаза изостава от е.д.н. на ъгъл φ' (фиг.13.2. б). Понеже токът във фаза A има максимална стойност, е.д.н. на фаза A е вече минало своята максимална стойност и в комплексната равнина е на ъгъл φ' . От това следва, че резултатния магнитен поток $\vec{\Phi}_\delta$, респ. резултатното м.д.н. \vec{F}_δ трябва да се нанесат в пространствената диаграма на ъгъл φ' напред (по посока на въртенето) спрямо $A-X$. След което се намира м.д.н. \vec{F}_f на възбудителната намотка. Сега то е по-голямо, отколкото в случая с активен товар и сключва по-голям ъгъл ψ с $A-X$.

При индуктивен товар $\varphi' = \frac{\pi}{2}$ (фиг.13.2.в). Следователно векторите на $\vec{\Phi}_\delta$ и \vec{F}_δ се нанасят на ъгъл $\psi = \frac{\pi}{2}$ спрямо линията $A-X$. В този случай м.д.н. \vec{F}_f е максимално. Двете м.д.н. на котвата \vec{F}_{a1} и на възбудяването \vec{F}_f са насочени в обратни посоки.

При капацитивен характер на товара $\varphi' = -\frac{\pi}{2}$. Векторът \dot{E}_δ изостава от тока на $\frac{\pi}{2}$ (фиг.13.2. г). Съгласно начина на определяне на положенията на векторите $\vec{\Phi}_\delta$ и \vec{F}_δ те ще съвпадат по посока с \vec{F}_{a1} . В този случай м.д.н. на възбудителната намотка \vec{F}_f е минимално.

От направения анализ следва, че при индуктивен товар полето на реакцията на котвата се противопоставя на полето на възбудителната

намотка и го намалява. При капацитивен характер полето на котвата действа намагнитващо. Следователно при зададени стойности на напрежението на котвата, големината на възбудителния ток трябва да се изменя в зависимост от характера на натоварването. Възбудителният ток ще е най-голям, когато товарът е индуктивен и ще бъде минимален при капацитивен товар.

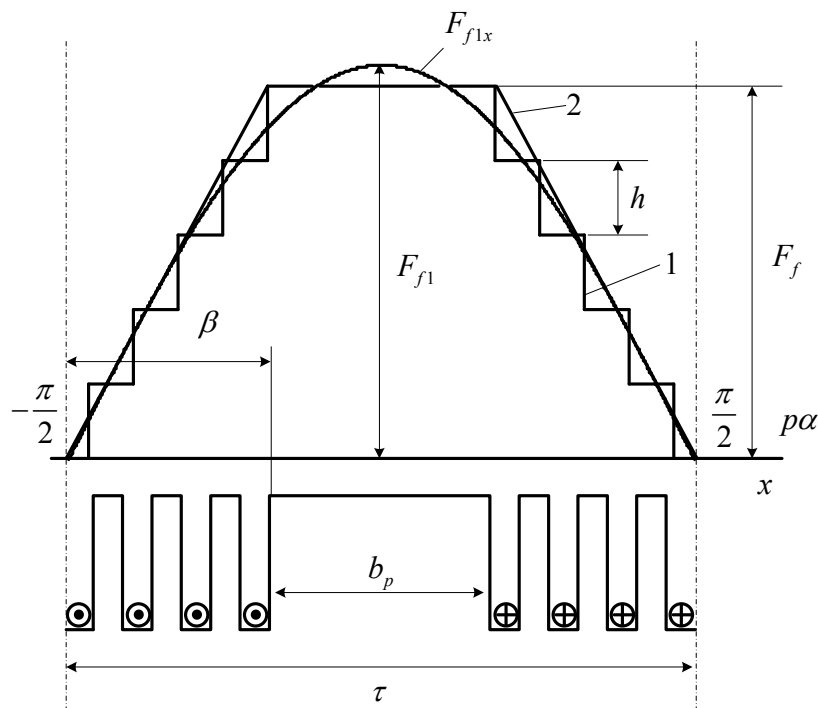
Въпрос 14

Магнитно поле и параметри на неявнополюсна и на явнополюсна машина

14.1. Магнитно поле и параметри на неявнополюсна машина

Магнитното поле на индуктора се създава от постоянен ток, който преминава през възбудителната намотка. То има две съставки - поле на взаимна индукция, което съществува във въздушната междина на статора и ротора, и влиза във взаимодействие с полето на котвата. Втората съставка е полето на разсейване около възбудителната намотка.

Възбудителната намотка се полага в каналите, които заемат по-голямата част от периферията на ротора, а останалата част няма канали. Тази зона от ротора за полюсно деление се нарича голям зъб и има ширина b_p (фиг.14.1).



Фиг.14.1.

Броят на навивките на цялата възбудителна намотка е w_f , за един полюс той е $\frac{w_f}{2p}$. Постоянния ток има големина I_f .

Пространствената крива на м.д.н. F_{fx} на възбудителната намотка на фиг.14.1 за един полюс е представена със стъпалната линия 1. Кривата на м.д.н. се изменя със скок в местата на разположението на проводниците, през които преминава ток. В зоната от окръжността, където няма проводници м.д.н. не се променя и се изразява графично чрез хоризонтална права линия. Степента на изменение на м.д.н. се определя от

$$h = u_k I_f. \quad (14.1)$$

където:

u_k - брой на проводниците в един канал.

Тази стъпална линия може да се апроксимира с трапец (крива 2 от фиг.14.1), което означава да се приеме равномерно разпределение на проводниците на възбудителната намотка по частта от периферията на индуктора, заета от каналите. Стойността на м.д.н. на възбудителната намотка за един полюс, равна на височината на трапеца, е

$$F_f = \frac{w_f}{2p} I_f. \quad (14.2)$$

М.д.н. на възбудителната намотка F_{fx} е периодична пространствена крива за всички полюси и следователно може да се разложи в безкраен ред от хармоници. На фиг.14.1 е показан основният хармоник на м.д.н., който има амплитуда

$$F_{f1} = \frac{4 \sin \beta}{\pi \beta} F_f = k_f F_f. \quad (14.3)$$

където:

β - ъгъл отговарящ за намотаната част на полюса;

$k_f = \frac{4 \sin \beta}{\pi \beta}$ - коефициент на формата.

Обикновено $\beta = (0,65 \div 0,8) \frac{\pi}{2}$, откъдето $k_f = 1,065 \div 0,965$. В теорията на синхронните машини обикновено се отчита само основният хармоник на е.д.н. и съответно като поток на взаимна индукция между ротора и статора се приема само основният хармоник на полето на възбуждане.

Основният хармоник на м.д.н. на възбудането при неявнополюсната синхронна машина, където може да се приеме, че въздушната междина е равномерна и следователно магнитната проводимост $\lambda_\delta = const$, създава синусоидално разпределено магнитно поле с индукция, която има амплитуда

$$B_{fm1} = \lambda_\delta F_{f1}. \quad (14.4)$$

Магнитният поток създаден от възбудителната намотка има амплитуда

$$\Phi_{fm} = \frac{2}{\pi} \tau l_\delta B_{fm1}. \quad (14.5)$$

Пълният поток на статорна фаза от потока на възбудителната намотка Φ_f , когато оста на тази фаза съвпада с оста на полюсите (ос a съвпада с ос d), е

$$\Psi_{fad} = wk_w \Phi_f, \quad (14.6)$$

където:

w - броят на навивките на намотката за една статорна фаза;
 k_w - коефициент на намотката.

Пълният поток Ψ_{fad} може да се изрази и чрез възбудителния ток

$$\Psi_{fad} = M_{fam} I_f, \quad (14.7)$$

където:

M_{fam} - взаимна индукция на възбудителната намотка и статорна фаза, чиято ос съвпада с оста d .

При въртене на ротора със скорост ω пълният поток на статорна фаза обхванат от полето на възбудане ще бъде

$$\Psi_{fat} = \Psi_{fad} \cos \omega t. \quad (14.8)$$

В статорните фази се индукира от полето на възбудане е.д.н. e_0 , чиято моментна стойност е

$$e_0 = -\frac{d\Psi_{fat}}{dt} = \omega M_{fam} I_f \sin \omega t = E_{0m} \sin \omega t. \quad (14.9)$$

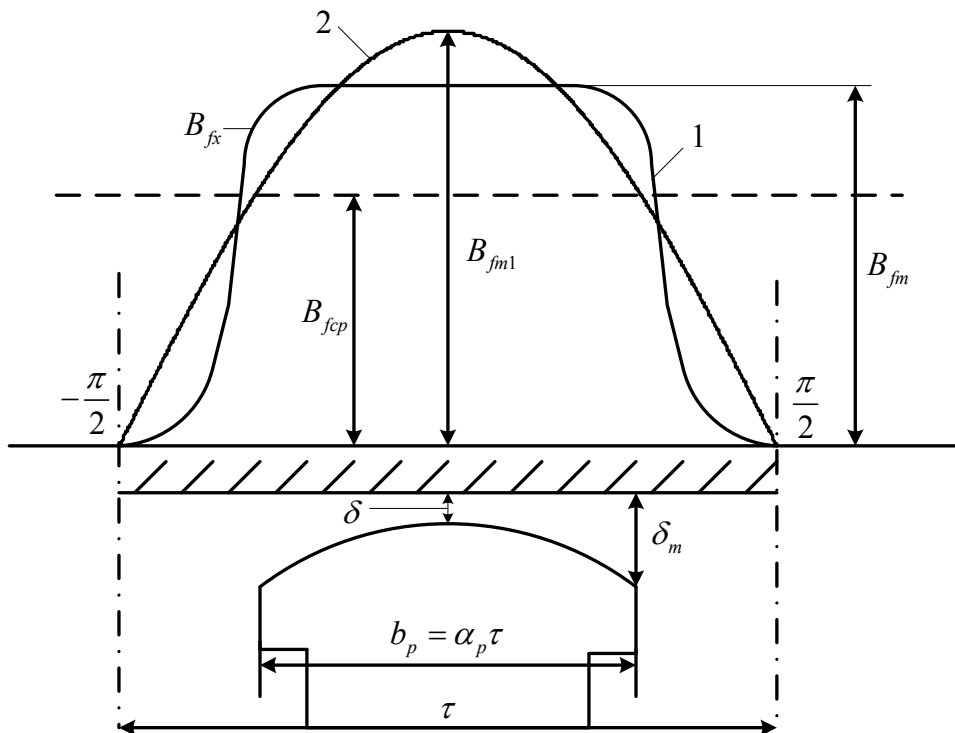
Ефективната стойност на е.д.н. e_0 е съответно равна на:

$$E_0 = \sqrt{2}\pi f w k_w \Phi_f = \frac{\omega M_{fam}}{\sqrt{2}} I_f = \omega M_{fad} I_f = x_{fad} I_f. \quad (14.10)$$

Величината $x_{fad} = \omega M_{fad}$ се нарича съпротивление на взаимна индукция, което дава връзката между възбудителния ток I_f и индуктираното е.д.н. в статорните намотки от потока на възбудането Φ_f .

14.2. Магнитно поле и параметри на явнополюсна машина

Разпределението на магнитното поле на явнополюсната машина и работният процес се различават от тези на неявнополюсната, което се дължи на неравномерната въздушна междина, съществуваща при явнополюсната роторна конструкция. Кривата на разпределение на магнитната индукция на полето на възбудане за едно полюсно деление е показано на фиг.14.2. В случая се пренебрегва наличието на канали в статорната повърхнина. Най-голяма стойност на индукцията има в средата на полюса, където въздушната междина е минимална.



Фиг.14.2.

Периодичната пространствена крива на B_{fx} може да се разложи в ред от синусоидални съставки. Амплитудата на основния хармоник на полето на възбудане се представя с израза

$$B_{fm1} = k_f B_{fm} = k_f \frac{\mu_0}{\delta'} F_f, \quad (14.11)$$

където:

k_f - коефициент на формата, зависещ от конструктивни параметри.

Обикновено $k_f = 0,95 \div 1,15$;

δ' - приведена въздушна междина;

μ_0 - магнитна проницаемост на въздуха.

Максималната стойност на действителната индукция е съответно

$$B_{fm} = \frac{\mu_0}{\delta'} F_f. \quad (14.12)$$

Магнитният поток във въздушната междина се определя от

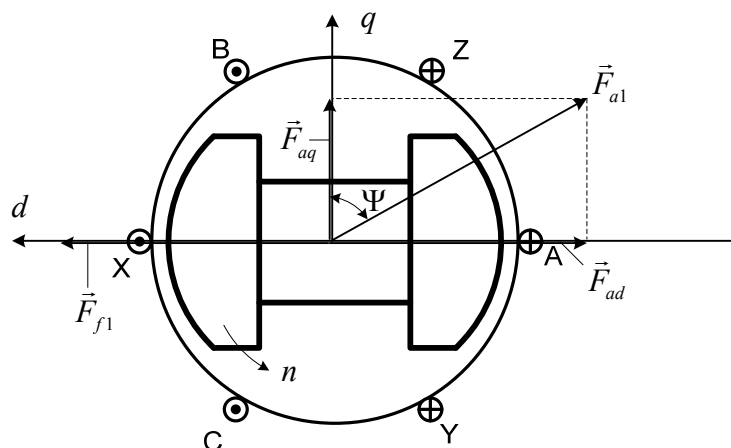
$$\Phi_{f\delta} = \tau l_\delta B_{fcp} = \alpha_\delta \tau l_\delta B_{fm}, \quad (14.13)$$

където:

$\alpha_\delta = \frac{B_{fcp}}{B_{fm}}$ - изчислителен коефициент на полюсната дъга.

Полето на възбуждане в явнополюсната синхронна машина индуктира е.д.н. в статорната намотка по същия начин както и в неявнополюсната синхронна машина. Анализът в т.14.1 относно E_0 и x_{fad} се отнася и за явнополюсна синхронна машина.

За анализ на магнитното поле и на явленията в явнополюсната синхронна машина се използва методът на двете реакции, предложен от френския електротехник Блондел. Същността на метода се заключава в разлагането на основния хармоник на м.д.н. на реакцията на котвата \vec{F}_{a1} на две съставки \vec{F}_{ad} и \vec{F}_{aq} , по двете оси на явнополюсната система d и q - фиг.14.3.



Фиг.14.3.

Съставките на м.д.н. \vec{F}_{a1} се определят от

$$\vec{F}_{ad} = \vec{F}_{a1} \sin \psi ; \vec{F}_{aq} = \vec{F}_{a1} \cos \psi . \quad (14.14)$$

Методът на Блондел се основава на принципа на наслагването, като изходната вълна на статорното м.д.н., които възбуждат отделни полета. Те индуцират две е.д.н. в статора.

Въпрос 15

Уравнение на напрежението на синхронен генератор (СГ). Векторни диаграми. Характеристики

15.1. Уравнение на напрежението на синхронен генератор

Уравнението на напрежението на синхронния генератор се извежда съгласно втори закон на Кирхоф. Индуцираното резултантно е.д.н. в една статорна фаза e_{res} се уравнива с напрежението на изводите на генератора u и активния пад на напрежение ir_a , както следва

$$e_{res} = u + ir_a , \quad (15.1)$$

където:

r_a - активно съпротивление на намотката на статорната фаза.

Индуцираното е.д.н. e_{res} се явява вследствие на изменението на резултантния пълен магнитен поток на фазата $\Psi_{res(t)}$, който е обхванат в резултат на действието на токовете, протичащи във всички намотки на синхронната машина, както следва

$$e_{res} = - \frac{d\Psi_{res(t)}}{dt} . \quad (15.2)$$

Като се замести (15.2) в (15.1) и се изрази напрежението се получава

$$u = - \frac{d\Psi_{res(t)}}{dt} - ir_a . \quad (15.3)$$

Резултантният пълен магнитен поток на статорна фаза (например A) се състои от пълния поток $\Psi_{sA(t)}$, създаден от статорните фазни токове и пълния поток $\Psi_{fA(t)}$, създаден от възбудителния ток:

$$\Psi_{resA(t)} = \Psi_{sA(t)} + \Psi_{fA(t)} . \quad (15.4)$$

Пълният поток $\Psi_{sA(t)}$ също се представя чрез две съставки:

$$\Psi_{sA(t)} = \Psi_{aA(t)} + \Psi_{\sigma A(t)}, \quad (15.5)$$

където:

$\Psi_{aA(t)}$ - пълен магнитен поток на реакция на тока на котвата;

$\Psi_{\sigma A(t)}$ - пълен магнитен поток на разсейване на статорна фаза.

Амплитудите на пълните магнитни потоци $\Psi_{aA(t)}$ и $\Psi_{fA(t)}$ са произведенията на амплитудите на съответните магнитни потоци и ефективните навивки на статорна фаза:

$$\Psi_{aA(t)} = wk_w \Phi_a, \quad (15.6)$$

$$\Psi_{fA(t)} = wk_w \Phi_{f1}. \quad (15.7)$$

Понеже магнитните потоци Φ_a и Φ_{f1} , съответно техните пълни потоци, се развиват в една обща магнитна верига, те си взаимодействат и образуват резултатен магнитен поток на взаимна индукция. На този поток съответства пълният магнитен поток $\Psi_{\delta A(t)}$, който може да се представи във вида

$$\Psi_{\delta A(t)} = \Psi_{aA(t)} + \Psi_{fA(t)}. \quad (15.7)$$

Въз основа на (15.4), (15.5) и (15.7) се получава

$$\Psi_{resA(t)} = \Psi_{\delta A(t)} + \Psi_{\sigma A(t)}. \quad (15.8)$$

Тогава уравнение (15.3) става

$$u = -\frac{d\Psi_{\delta(t)}}{dt} - \frac{d\Psi_{\sigma(t)}}{dt} - ir_a. \quad (15.9)$$

В това уравнение е изпуснат индекса A . То се отнася за всяка фаза на симетрична многофазна синхронна машина. Отделните съставки на напрежението се изразяват чрез съответни е.д.н.:

$$e_{\delta} = -\frac{\Psi_{\delta(t)}}{dt}, \quad (15.10)$$

$$e_{\sigma a} = -\frac{d\Psi_{\sigma(t)}}{dt} = -L_{\sigma a} \frac{di}{dt}, \quad (15.11)$$

където:

e_δ - моментна стойност на е.д.н., индуцирано в статорна фаза от резултатния магнитен поток на синхронната машина;

$e_{\sigma a}$ - моментна стойност на е.д.н. на разсейване на статорна фаза;

$L_{\sigma a}$ - индуктивност на разсейване на фаза (пълният поток на разсейване може да се представи чрез съответната индуктивност и протичащия ток - $\Psi_{\sigma(t)} = L_{\sigma a} i$).

Тогава уравнение (15.9) се преобразува във вида

$$e_\delta + e_{\sigma a} = u + ir_a. \quad (15.12)$$

В установен синусоиден режим това уравнение е съответно

$$\dot{E}_\delta + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{U} + \dot{I}r_a \quad (15.13)$$

и

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}r_a - \dot{E}_{\sigma a} = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I}, \quad (15.14)$$

където:

$x_{\sigma a}$ - индуктивно съпротивление на разсейване на статорна фаза.

Уравнения (15.13) и (15.14) се отнасят както за неявноплюсна, така и за явноплюсна синхронна машина.

15.2. Уравнения на неявноплюсен синхронен генератор

В уравнения (15.12) и (15.14) участва действителното е.д.н. e_δ , индуцирано в статорна фаза от резултатния магнитен поток на взаимна индукция, който преминава през въздушната междина. Ако се приеме, че магнитната верига на синхронната машина е ненаситена и следователно нейната магнитна характеристика е линейна, може да се приложи принципът на наслагането. Съгласно него резултатният магнитен поток е сумата от два потока: Φ_f - създаден от възбудителната намотка и Φ_a - създаден от котвената намотка. Всеки от тези потоци индуцира отделно е.д.н. в статорните фазови намотки. Резултатното е.д.н. E_δ е сума от две е.д.н.:

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a, \quad (15.15)$$

където:

\dot{E}_0 - е.д.н. индуцирано в статорна фаза от изменението на потока на възбудителната намотка Φ_f ;

\dot{E}_a - е.д.н. индуцирано от изменението на потока на котвата Φ_a ;

Тогава уравнение (15.14) се трансформира във вида

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_0 + \dot{E}_a = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I}. \quad (15.16)$$

Е.д.н. \dot{E}_0 и \dot{E}_a се изразяват като падове на напрежения в съответните индуктивни съпротивления

$$\dot{E}_0 = -jx_{fad}\dot{I}_f, \quad (15.17)$$

където:

x_{fad} - индуктивно съпротивление на взаимна индукция между възбудителната и котвената намотка;

$$\dot{E}_a = -jx_a\dot{I}, \quad (15.18)$$

където:

x_a - индуктивно съпротивление на фаза от реакцията на котвата.

Тогава (15.16) се преобразува в

$$\dot{E}_\delta = -jx_{fad}\dot{I}_f - jx_a\dot{I} = -jx_a\dot{I}_M, \quad (15.19)$$

където:

$\dot{I}_M = \dot{I} + \dot{I}_f$ - намагнитващ ток.

От уравнения (15.16) и (15.18) се получава

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I} + jx_a\dot{I}, \quad (15.20)$$

или

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_d\dot{I}, \quad (15.21)$$

където:

$x_d = x_{\sigma a} + x_a$ - синхронно индуктивно съпротивление на неявнополусна синхронна машина.

15.3. Уравнения на явнополусен синхронен генератор

В явнополусната синхронна машина двата магнитни потока Φ_{f1} и Φ_{ad} действат в една обща магнитна верига и образуват резултантния магнитен поток Φ_{fd} по оста d . На този поток отговаря пълният магнитен

поток $\Psi_{fd(t)}$ за статорна фаза. Потокът по напречната ос от реакцията на котвата Φ_{aq} създава пълния поток $\Psi_{aq(t)}$. Тези два потока индуцират е.д.н в една статорна фаза

$$e_{\delta d} = -\frac{d\Psi_{fd(t)}}{dt}; e_{aq} = -\frac{d\Psi_{aq(t)}}{dt}. \quad (15.22)$$

Потокът на разсейване $\Phi_{\sigma a}$, индуцира е.д.н. $e_{\sigma a}$. Е.д.н. $e_{\delta d}$, e_{aq} и $e_{\sigma a}$ поддържат равновесие с напрежението на изводите на генератора и пада на напрежение в активното съпротивление r_a :

$$e_{\delta d} + e_{aq} + e_{\sigma a} = u + ir_a. \quad (15.23)$$

В синусоиден установен режим и симетричен товар уравнението за напреженията за една фаза е

$$\dot{E}_{\delta d} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} = \dot{U} + \dot{I}r_a. \quad (15.24)$$

При линейна система е.д.н $\dot{E}_{\delta d}$ може да се разглежда като сума от две съставки:

$$\dot{E}_{\delta d} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad}, \quad (15.25)$$

където:

\dot{E}_0 - е.д.н. индуцирано от потока на възбудителната намотка Φ_{f1} ;

\dot{E}_{ad} - е.д.н. индуцирано от потока на надлъжната реакция на котвата Φ_{ad} .

Като се вземе предвид и, че $\dot{E}_{\sigma a} = -jx_{\sigma a}\dot{I}$ уравнение (15.24) добива вида:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I}. \quad (15.26)$$

Като се заместят $\dot{E}_{ad} = -jx_{ad}\dot{I}_{ad}$ и $\dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}_{aq}$ в (15.26), се получава:

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I} + jx_{aq}\dot{I}_{aq} + jx_{ad}\dot{I}_{ad}. \quad (15.27)$$

Като се представи токът $\dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$ в пада на напрежение в индуктивното съпротивление на разсейване $jx_{\sigma a}\dot{I} = jx_{\sigma a}(\dot{I}_d + \dot{I}_q)$ и се извърши рационализация се получава

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + j(x_{\sigma a} + x_{aq})\dot{I}_q + j(x_{\sigma a} + x_{ad})\dot{I}_d \quad (15.28)$$

ИЛИ

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_q\dot{I}_q + jx_d\dot{I}_d, \quad (15.29)$$

където:

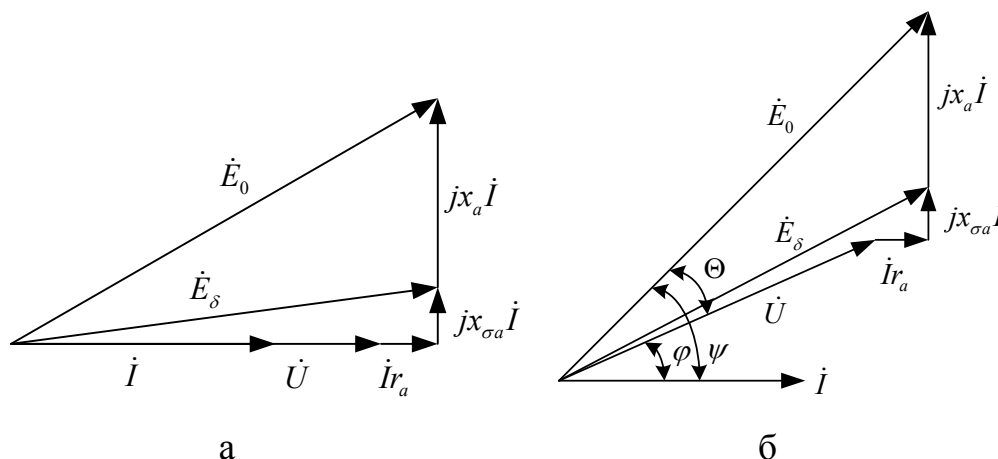
$x_d = x_{\sigma a} + x_{ad}$ и $x_q = x_{\sigma a} + x_{aq}$ - индуктивни съпротивления на явнополюсната синхронна машина по надлъжната, респ. по напречната ос.

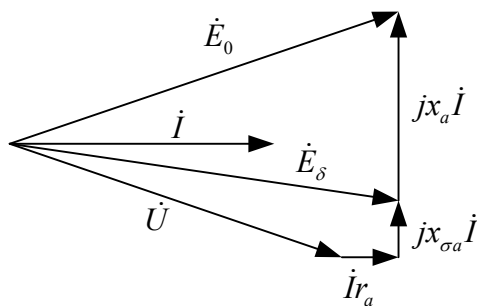
15.4. Векторни диаграми на СГ

15.4.1. Векторни диаграми на неявнополюсен синхронен генератор

С помощта на полученото уравнение на напрежението (15.20) могат да се получат векторните диаграми на неявнополюсния синхронен генератор за фаза при работа с товар с различен характер. За построяването им за основен вектор се приема векторът на тока на фазата и спрямо него се извършва построяването. Приема се, че токът \dot{I} е с нулева фаза и се нанася вектора му по абцисната ос. Векторът на напрежението \dot{U} се нанася на ъгъл φ определен от характера на товара. Векторът на активния пад на напрежение $\dot{I}r_a$ е успореден на вектора на тока и се нанася от върха на вектора на напрежението. Векторът на пада в индуктивното съпротивление $jx_{\sigma a}\dot{I}$ се нанася от върха на $\dot{I}r_a$ на ъгъл 90° . Векторът на е.д.н. \dot{E}_s се получава като се извърши векторната сума съгласно (15.14), т.е. началото му да започва от началото на координатната система и върхът му да се свърже с върха на $jx_{\sigma a}\dot{I}$. Векторът на е.д.н. \dot{E}_0 се получава като се извърши векторната сума съгласно (15.20).

На фиг.15.1. са показани векторните диаграми за три характера на товара. Диаграмата за чисто активен товар е показана на фиг.15.1.а, за активно-индуктивен - на фиг.15.1.б, за активно-капацитивен - на фиг.15.1.в.





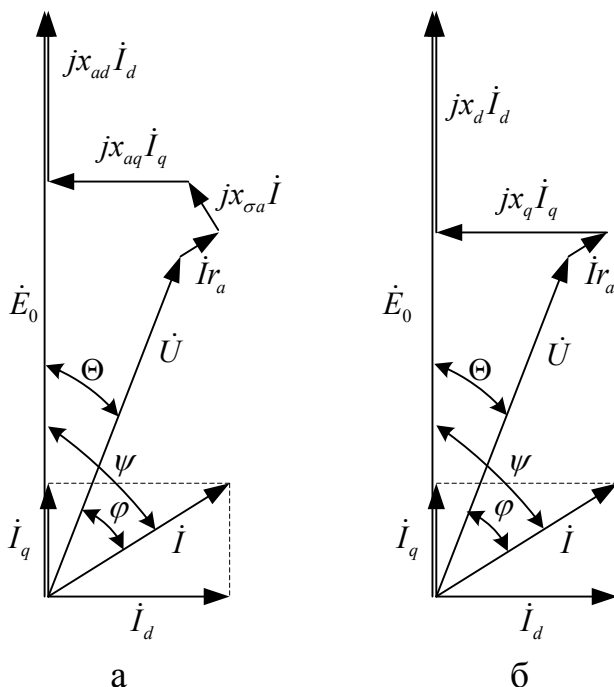
В
Фиг.15.1

По аналогичен начин могат да бъдат построени и диаграмите при чисто индуктивен и капацитивен товар.

15.4.2. Векторни диаграми на явнополюсен синхронен генератор

Векторната диаграма на явнополюсен генератор се построява на базата на уравнения (15.27) и (15.29) при зададен товар.

На фиг.15.2а е показана векторната диаграма на явнополюсен генератор при активно-индуктивен характер построена по (15.27) (диаграма на Блондел), а на фиг.15.2б е показана векторната диаграма построена по (15.29).



Фиг.15.2

Построяването се извършва аналогично, както на неявнополюсен генератор.

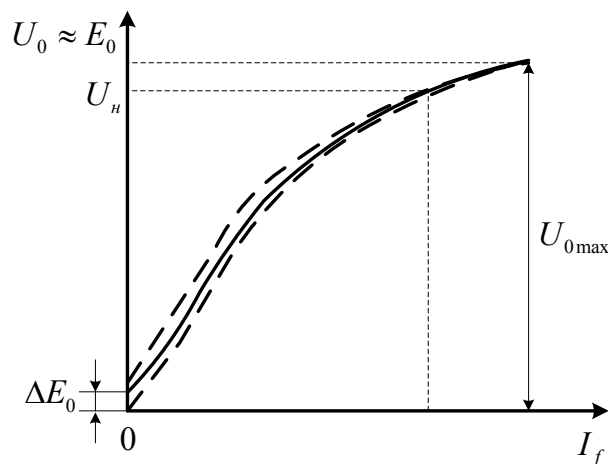
15.4. Характеристики

Свойствата на синхронните генератори се определят от техните характеристики. Характеристиките на синхронните генератори са следните:

- характеристика на празен ход (х.п.х.);
- характеристика на късо съединение (х.к.с.);
- външни характеристики;
- регулационни характеристики;
- товарни характеристики.

15.4.1. Характеристика на празен ход

Характеристиката на празен ход се получава по опитен път. Роторът се върти от външен двигател с константна скорост равна на номиналната, а статорната намотка е отворена. Характеристиката представлява зависимостта на изходното напрежение на генератора U_0 от големината на възбудителния ток I_f , т.е $U_0 = f(I_f)$ при $I = 0$ и $n = const$. При снемането на характеристиката възбудителният ток се изменя от нула до някаква максимална стойност, при което $U_0 > U_n$ (например $U_{0max} = 1,25 U_n$) и след това се намаля до нула. Поради хистерезиса възходящият и низходящият клон на х.п.х. се различават (фиг.15.3).

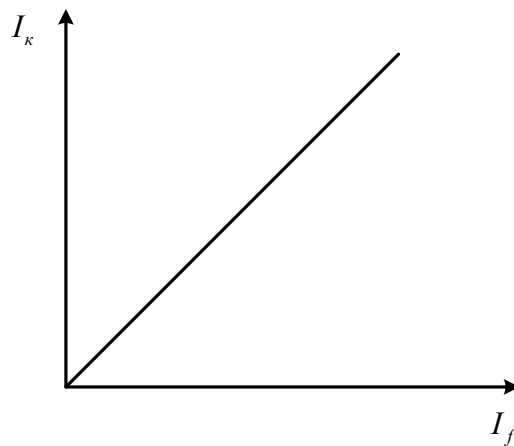


Фиг.15.3.

За характеристика на празен ход се приема средната плътна линия. Точката от ординатната ос, която се пресича от х.п.х., определя остатъчното е.д.н. E_0 , индуцирано от остатъчния магнитен поток.

15.4.2. Характеристика на късо съединение

Характеристиката на късо съединение представлява зависимостта на тока на фаза на синхронния генератор I_{κ} от възбудителния ток I_f при номинална скорост на въртене и при симетрично трифазно късо съединение, т.е. $I_{\kappa} = f(I_f)$ при $U = 0$ и $n_n = const$. Измерванията се извършват бързо, за да не бъдат големи измененията в температурата на намотките. Започва се от най-голямата стойност на статорния ток, например $I_{\kappa} = 1,25 I_n$, който се намалява плавно. Видът на характеристиката на късо съединение е показан на фиг.15.4.

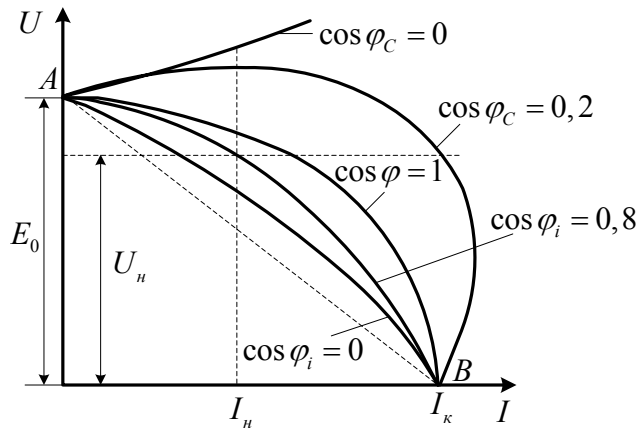


Фиг.15.4.

Характеристиката е права линия, тъй като при опита на късо съединение магнитната верига не е наситена.

15.4.3. Външна характеристика

Външната характеристика представлява зависимостта на генераторното напрежение U при натоварване при константни възбудителен ток, ъглова скорост и фактор на мощността т.е. $U = f(I)$ при $I_f = const$, $n = const$ и $\cos \varphi = const$ при работа в автономна мрежа (фиг.15.5).

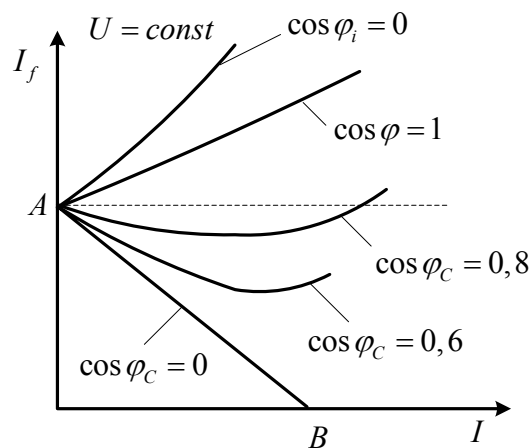


Фиг.15.5.

Както се вижда от фиг.15.5. характеристиките имат две общи точки: т. А от ординатната ос отговаряща на напрежението на празен ход при зададен възбудителен ток и т. В на абсисната ос, отговаряща на тока на късо съединение при същия възбудителен ток.

15.4.4. Регуляционна характеристика

Тази характеристика показва как трябва да се променя възбудителният ток на синхронния генератор при промяна на товарния ток, за да се поддържа напрежението на изходите на генератора постоянно т.е. $I_f = f(I)$ при $U = const$, $\cos \varphi = const$ и $n = const$. На фиг.15.6. са показани регуляционни характеристики за различни стойности на $\cos \varphi$.



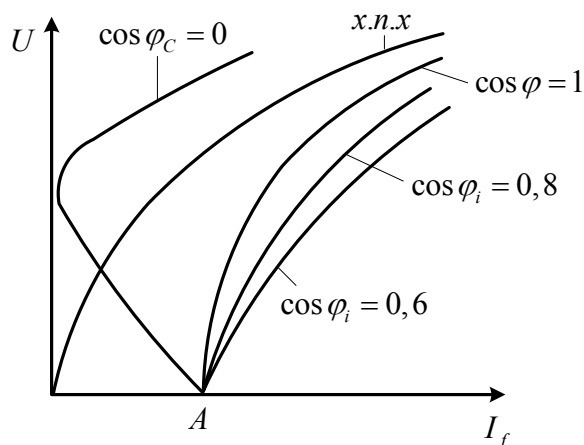
Фиг.15.6.

При чисто капацитивен товар регуляционната характеристика в т. В достига абсисната ос. Оказва се, че в тази точка $I_f = 0$. Такъв режим е възможен, ако синхронният генератор е свързан към отворен електропровод или захранва изпитателен трансформатор за изпитване на изолацията на кабели за високо напрежение или за големи електрически

машини. Тогава е възможен процес на самовъзбуждане на синхронния генератор под действието на капацитивния товар и остатъчното е.д.н. в котвената намотка.

15.4.5. Товарна характеристика

Тази характеристика е свързана с някакъв работен режим на синхронния генератор в автономна мрежа и представлява зависимостта на генераторното напрежение от възбудителния ток при постоянен товарен ток, характер на товара и постоянни обороти, т.е. $U = f(I_f)$ при $I = const$, $\cos \varphi = const$ и $n = const$. На фиг.15.7. са показани товарните характеристики за различни стойности на $\cos \varphi$ и $I = const$. За сравнение е показана и характеристиката на празен ход.



Фиг.15.7.

Всички товарни характеристики имат обща точка А, лежаща на абсисната ос. Тя отговаря за напрежение $U = 0$, т.е. състояние на късо съединение при зададения за товарните характеристики товарен ток I .

Най-голямо практическо значение има товарната индуктивна характеристика при $\cos \varphi_i = 0$ и $I = I_n$.

Въпрос 16

Паралелна работа на синхронните генератори

16.1. Общи сведения

Синхронните генератори могат да работят като източници на електрическа енергия в автономни мрежи за отделни консуматори или да работят паралелно, включени на общи шини няколко синхронни генератора. Паралелната работа на синхронните генератори има редица положителни страни:

- надеждност на електроснабдяването;
- възможност за включване или изключване на отделни синхронни машини при промяна на товара в електроенергийната система;
- осигуряване на аварийен и ремонтен резерв;
- регулиране и разпределение на активната и реактивната мощност между паралелно работещите генератори.

Паралелната работа се изразява във:

- включване на синхронните машини към шините, т.е. т.нар. синхронизация;
- поддържане на паралелна работа, т.е. поддържане на синхронизма.

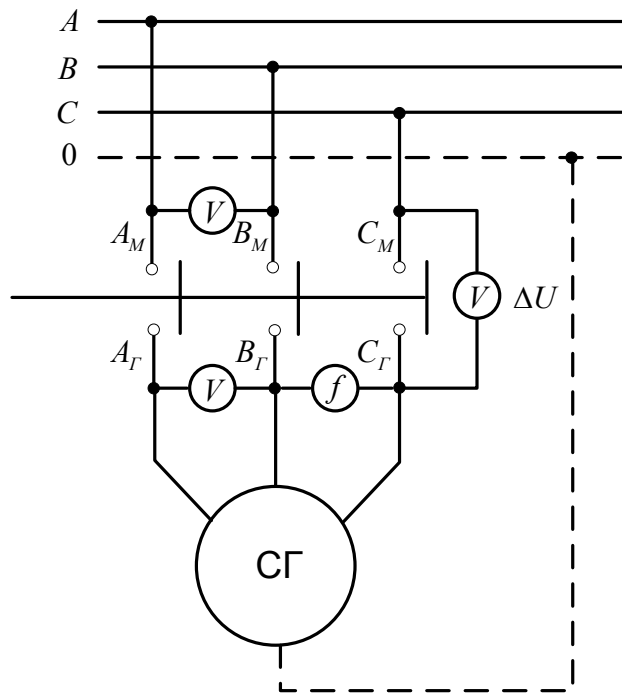
Това означава, че всеки синхронен генератор трябва да участва в общия електрически товар съобразно със своята мощност, като неговият ротор се върти в такт с роторите на останалите синхронни генератори, т.е. синхронно.

16.2. Включване в паралелна работа

При включване на синхронен генератор към захранващата мрежа (фиг.16.1) трябва да се спазят няколко условия, за да не протекат големи токове и да се създават големи електродинамични сили, които да осуетят процеса на синхронизация.

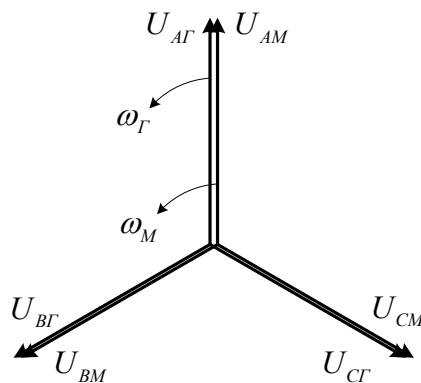
Трябва да бъдат спазени следните условия:

- еднакъв фазов ред на напреженията на генератора и фазните напрежения на мрежата;
- ефективните стойности на напреженията на генератора и на мрежата да са еднакви;
- честотата на напреженията на генератора и на мрежата да са еднакви;
- еднаква форма на напреженията на генератора и на мрежата;
- в момента на включването напреженията на генератора и на мрежата да са еднакви.



Фиг.16.1.

Ако се спазят тези условия векторите на напреженията на генератора и на мрежата си съвпадат, имат еднакви модули и се въртят с еднаква скорост. Потенциалната разлика между едноименните изводи на мрежата и генератора е нула (фиг.16.2).



Фиг.16.2.

Изравняването на напреженията по стойност се постига чрез регулиране на възбудителния ток на генератора и се контролира с волтметри. Честотата и фазовата разлика се регулират чрез промяна на ъгловата скорост на синхронния генератор.

При включването на големите синхронни генератори в електроцентралите се използват автоматични синхронизиращи уредби, които осигуряват автоматично регулиране на честотата и големината на напрежението.

Моментът на включване се избира, когато между трите едноименни фази на генератора и мрежата $U = 0$. Това е доста трудно да се осъществи, поради което може да съществува някаква минимална разлика в напреженията или в честотите в момента на включването. Точната синхронизация се допуска при разлика $(f_z - f_{mp}) < 0,3 \text{ Hz}$.

Ако включването на генератора е при някакво минимално напрежение, ще протече изравнителен ток в намотките на генератора и ще се създаде електромеханичен момент. Този момент действа ускоряващо или забавящо върху ротора, така че да се постигне $f_z = f_{mp}$ и генераторът влиза в синхронизъм.

Методът на точната синхронизация изисква сложни и скъпи уредби и определен интервал от време, за да се реализира включването. Понякога се налага бързо включване на синхронен генератор в системата, например при аварийни ситуации. В такъв случай намира приложение методът на самосинхронизацията (груба синхронизация).

Самосинхронизацията протича по следния ред. Невъзбуденият ротор се завърта до скорост близка до синхронната. Статорната намотка се включва към мрежата под напрежение. Възбудителната намотка е затворена през активно съпротивление. В синхронния генератор се развива електромагнитен преходен процес, подобен на внезапно късо съединение на синхронен генератор. Допуска се токът на включване през статорната намотка да достигне до $3,5I_n$. След това към възбудителна намотка на ротора се прилага постоянно напрежение, протича възбудителен ток, създава се синхронизиращ момент и след колебания роторът влиза в синхронизъм.

При самосинхронизацията не е необходимо да се изравняват точно честотата и напрежението на генератора преди включване, което намалява времето на включване.

Въпрос 17

Ъглови характеристики на СМ. Статическо претоварване. Синхронизираща мощност и момент

17.1. Ъглови характеристики

Активната електрическа мощност на синхронната машина се изразява чрез фазните електрическите величини, измервани на изводите на машината

$$P = mUI \cos \varphi = \operatorname{Re}[\dot{S}], \quad (17.1)$$

където:

$\dot{S} = m\dot{U}\dot{I}$ - комплексна стойност на привидната мощност.

Електромагнитната мощност P_δ на синхронната машина е мощността, която се предава през въздушната междина чрез електромагнитното поле. Тя може да се изрази с електрическата мощност P и загубите в статора:

$$P_\delta = P \pm (p_{c1} + p_{e\pi1}), \quad (17.2)$$

където:

p_{c1} - загуби в статорния магнитопровод;

$p_{e\pi1} = mI^2r_a$ - електрически загуби в статорната трифазна намотка.

Знакът (+) се отнася за синхронен генератор, а знакът (-) - за синхронен двигател. Ако се пренебрегнат загубите в стоманата, тогава $P_\delta = P \pm p_{e\pi1}$. За синхронен генератор

$$P_\delta = P + p_{e\pi1} = mUI \cos \varphi + mI^2r_a. \quad (17.3)$$

Действителното е.д.н. \dot{E}_δ се определя от (15.14) и има вида $\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}r_a + jx_{\sigma a}\dot{I}$. Въз основа на уравнения (17.1) и (17.3) се доказва, че електромагнитната мощност може да бъде представена с израза

$$P_\delta = \text{Re}[m\dot{E}_\delta\dot{I}]. \quad (17.4)$$

За анализа на някои състояния на синхронната машина при нейната паралелна работа с мрежата е удобно мощностите P_δ и P да бъдат изразени чрез напрежението U , е.д.н. E_0 и ъгъла Θ , сключен между векторите \dot{U} и \dot{E}_0 . Това става с помощта на векторната диаграма от фиг.15.2б и уравнения (15.14) и (15.29), както и стойността на r_a се пренебрегва. След преобразувания за мощността P_δ се получава следния израз

$$P_\delta = \frac{mE_0U}{x_d} \sin \Theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\Theta. \quad (17.5)$$

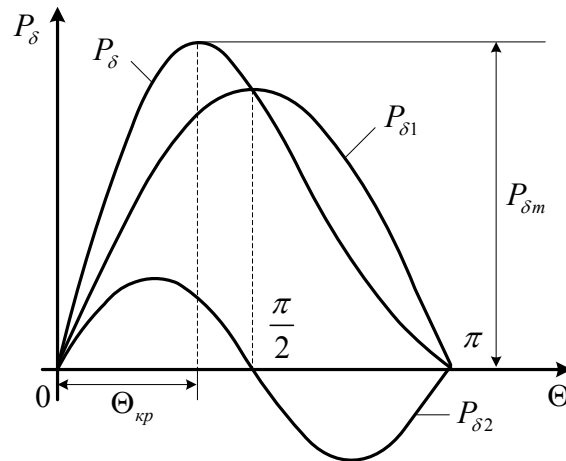
Първият член в (17.5)

$$P_{\delta1} = \frac{mE_0U}{x_d} \sin \Theta$$

определя основната съставка на мощността на генератора, която зависи както от напрежението на мрежата, така и от E_0 , респ. от възбудителния ток. Вторият член в (17.5)

$$P_{\delta 2} = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\Theta$$

определя допълнителна съставка на електромагнитната мощност. На фиг.17.1 е показана ъглова характеристика на явнополюсен генератор.



Фиг.17.1.

Зависимостта $P_{\delta} = f(\Theta)$ се нарича ъглова характеристика на синхронна машина. Понеже електромагнитната мощност, а следователно електрическата активна мощност P са функции на ъгъл Θ , той се нарича ъгъл на натоварването. Максималната мощност $P_{\delta m}$ на явнополюсната машина се получава при $\Theta_{кр} < \frac{\pi}{2}$.

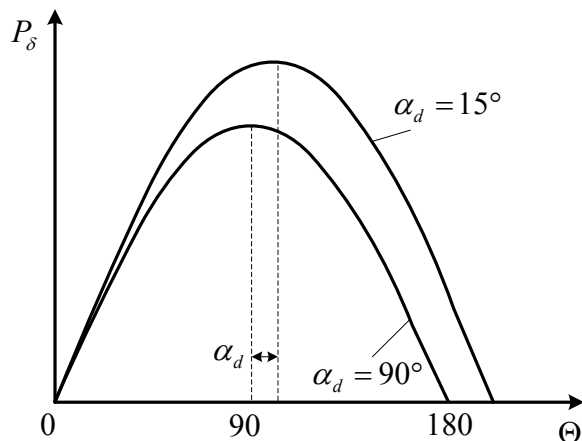
Изразът за електромагнитната мощност на неявнополюсната машина има вида

$$P_{\delta} = mE_0 \left[(E_0 - U \cos \Theta) \frac{r_a}{r_a^2 + x_d} + \frac{U \sin \Theta}{r_a^2 + x_d} x_d \right]. \quad (17.6)$$

Ако се пренебрегне r_a , за електромагнитната мощност се получава

$$P_{\delta} = \frac{mE_0 U}{x_d} \sin \Theta. \quad (17.7)$$

На фиг.17.2 са показани ъгловите характеристики на неявнополюсен генератор за $r_a = 0$ и $r_a > 0$.



Фиг.17.2.

При $r_a = 0$ максимумът на мощността $P_{\delta m}$ се получава при $\Theta = \frac{\pi}{2}$. При отчитане на активното съпротивление максимума на мощността е при $\Theta > \frac{\pi}{2}$.

Електромагнитният момент, който се създава в синхронната машина от взаимодействието на резултантното електромагнитно поле с токовете в котвата при синхронен режим на работа, се изразява чрез електромагнитната мощност P_δ и синхронната ъглова скорост $\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$

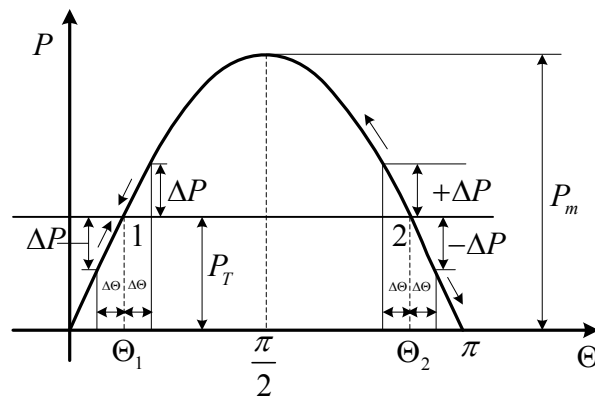
$$M_\delta = \frac{P_\delta}{\Omega_1}. \quad (17.8)$$

17.2. Статическо претоварване. Синхронизираща мощност и момент

След включването и синхронизирането на даден синхронен генератор към електрическата мрежа той започва да работи в паралел с други генератори, като отдава активна електрическа мощност и обменя реактивна. При паралелната работа възникват процеси, свързани с поддържане на синхронизма на генератора. Тези процеси се пораждат при промяна на натоварването на генератора, при изменение на механичния момент, при изменение на възбудителния ток и др. По тези причини могат да се създадат условия, при които генераторът не може да поддържа своята паралелна работа с мрежата и да изпадне от синхронизъм.

Ако мощността, която синхронният генератор получава от първичния двигател, не е точно равна на отдаваната електрическа мощност в мрежата (плюс собствените загуби на генератора) роторът ще започне да се ускорява или забавя спрямо въртящото са поле, при което $n \neq n_1$ и $f \neq f_{mp}$ и синхронният генератор ще излезе от синхронизъм. На практика обаче

при промяна на механичния момент в определени граници генераторът запазва своята способност за паралелна работа. Това може да се покаже на базата на ъгловата характеристика на фиг.17.3.



Фиг.17.3.

Механичната мощност на първичния двигател (парна или хидравлична турбина) се означава с P_T . Ако се пренебрегнат загубите в синхронния генератор, в установен режим трябва да съществува равенство между входяща и изходяща мощност - $P = P_T$. Мощността на турбината не зависи от ъгъл Θ и характеристиката $P_T = f(\Theta)$ е права линия, успоредна на абсисната ос.

Пресечните точки 1 и 2 на $P_T = f(\Theta)$ с ъгловата характеристика определят двете възможни състояния на работа на синхронния генератор, при което се осигурява равенство на мощностите.

В т.1 ъгъл $\Theta = \Theta_1$. Нека се приеме, че роторът получава ускорение и ъгъл Θ нараства с $\Delta\Theta$. Както се вижда от фиг.17.3, това довежда до увеличаване на електрическата мощност на генератора $P + \Delta P$, т.е. генераторът отдава по-голяма мощност, отколкото получава от турбината. Вследствие на това върху вала ще започне да действа отрицателен динамичен момент, роторът ще се забави, ъгъл Θ ще намалее, докато стигне до т.1. Ако при работа в т.1 ъгъл Θ се намали с $\Delta\Theta$, ще се получи $P < P_T$. Сега динамичният момент е положителен, роторът ще се ускори и ъгъл Θ ще нарасне, докато генераторът се върне в състоянието, отговарящо на т.1. Следователно т.1 е точка на устойчива работа.

При работа на генератора в т.2, ако по някаква причина ъгъл Θ нарасне с $\Delta\Theta$, това отговаря на намаляне на отдаваната мощност с ΔP . Върху вала на генератора се създава положителен динамичен момент, роторът ще се ускори, ъгъл Θ ще продължи да нараства и генераторът ще излезе от синхронизъм. Ако при работа в т.2 ъгъл Θ се намали с $\Delta\Theta$, отдаваната мощност на генератора става по-голяма от получаваната и роторът ще се забави, което довежда до по-нататъшно намаляване на ъгъл

Θ , докато се възтанови равенството на мощностите в т.1. Следователно т.2 е точка на неустойчива работа на синхронния генератор.

Така критерия за устойчива работа на синхронния генератор при приетите условия е

$$\frac{dP}{d\Theta} > 0. \quad (17.9)$$

Следователно работата на неявнополюсния синхронен генератор е устойчива в областта $0 < \Theta < 90^\circ$ и неустойчива в областта $90^\circ < \Theta < 180^\circ$. За явнополюсен синхронен генератор максимална мощност се достига при ъгъл $\Theta_{кр} < 90^\circ$.

Отношението на максималната мощност P_m към номиналната P_n на синхронен генератор, отчетено от ъгловата характеристика, се нарича коефициент на статическо претоварване или само статическо претоварване

$$k_{\Pi} = \frac{P_m}{P_n}. \quad (17.10)$$

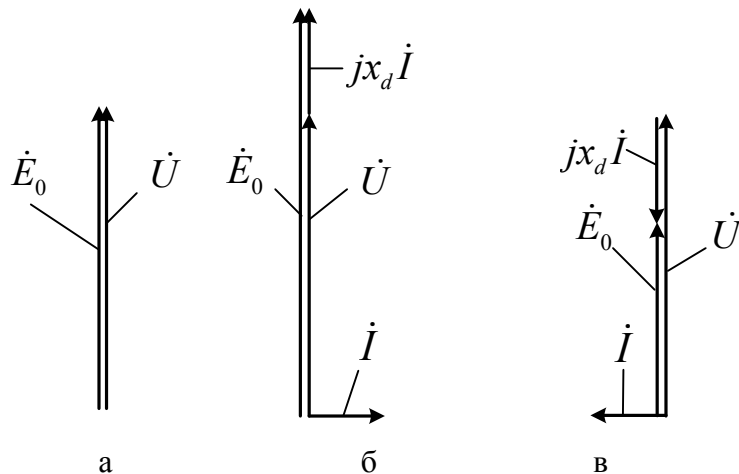
Запазването на своята синхронна работа при определени граници при отклонение на ъгъл Θ се дължи на дебаланса на мощностите $\Delta P = P - P_T$, който възниква при отклонение на ъгъл Θ с $\Delta\Theta$. Под действието на ΔP се възтановява устойчивата паралелна работа на синхронния генератор. Мощността ΔP се нарича синхронизираща мощност. На тази мощност съответства електромагнитен момент ΔM_δ , под действието на който роторът се забавя или ускорява и се връща устойчивото равновесие. Този момент се нарича синхронизиращ.

Въпрос 18

Превъзбуждане и недовъзбуждане на синхронна машина. V - криви

18.1. Превъзбуждане

След точно синхронизиране и паралелно включване към мрежата на синхронен генератор той работи на празен ход, т.е. $P_2 = 0$. В този случай ток през намотките на котвата не протича и е.д.н. \dot{E}_0 , което отговаря на потока на индуктора, уравновесява напълно напрежението на мрежата, т.е. $\dot{E}_0 = \dot{U}_{mp} = \dot{U}$ фиг.18.1а.



Фиг.18.1.

Ако се увеличи възбудителният ток I_f , ще се увеличи потокът Φ_f на индуктора и съответно е.д.н. E_0 . Понеже мрежата е с безкрайно голяма мощност, напрежението ѝ е константно, напрежението на изводите на генератора остава също неизменно. Следователно в генератора се получава вътрешен пад на напрежение. Този пад е равен на разликата $\dot{E}_0 - \dot{U}$. Щом има пад на напрежение следователно през котвената намотка протича ток. При пренебрегване на активното съпротивление $r_a = 0$, този ток ще има стойност

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}}{jx_d}. \quad (18.1)$$

Този ток се нарича изравнителен, защото предизвиква пад на напрежение, което изравнява напрежението на генератора с напрежението на мрежата. При случая $\dot{E}_0 > \dot{U}$ се получава векторната диаграма показана на фиг.18.1б.

Падът на напрежение $jx_d \dot{I}$ има индуктивен характер, което означава, че векторът му винаги изпреварва вектора на тока \dot{I} на ъгъл $\pi/2$, както е показано на фиг.18.1б. От същата фигура може да се види, че векторът на тока \dot{I} от своя страна изостава от вектора на мрежовото напрежение \dot{U} на ъгъл $\pi/2$, което означава, че синхронният генератор отдава в мрежата чисто индуктивен ток. В този случай се казва, че машината е превъзбудена и тя отдава в мрежата реактивна мощност, която ще се потребява от индуктивните товари (асинхронни двигатели, трансформатори и др.).

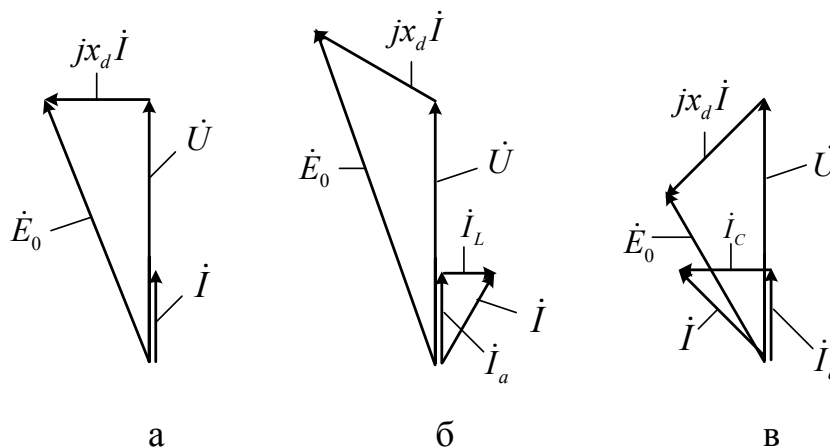
18.2. Недовъзбудане

Вместо да бъде увеличен, възбудителният ток I_f може да бъде намален. Тогава потокът Φ_0 и е.д.н. E_0 , което той индуцира в котвената намотка намаляват. За да се поддържа напрежението на генератора равно на напрежението на мрежата, започва да протича изравнителен ток. В случая, когато $\dot{E}_0 < \dot{U}$ се получава векторната диаграма показана на фиг.18.1в. Както се вижда, при тези условия векторът на тока \dot{I} изпреварва на ъгъл $\pi/2$ вектора на напрежението \dot{U} , т.е. синхронният генератор отдава капацитивен ток и консумира от мрежата реактивна мощност. Този ток довъзбужда генератора, тъй като неговото собствено възбуждане е по-малко от нормалното, т.е. реакцията на котвата е намагнитваща.

Тези свойства на синхронните машини да променят обмена на реактивна енергия с мрежата се използва за регулиране на фактора на мощността в електроенергийните системи.

18.3. Изменение на възбудането при товар

В този случай генераторът е натоварен с активна мощност $P_2 = const$. Тъй като товарът е чисто активен, векторът на тока \dot{I} е съпосочен с вектора на напрежението \dot{U} . Този ток предизвиква пад на напрежение в съпротивлението на генератора. Тъй като съпротивлението на генератора е индуктивно (приема се $r_a = 0$), то векторът на пада $jx_d \dot{I}$ изпреварва вектора на тока на ъгъл $\pi/2$ - фиг.18.2а.



Фиг.18.2.

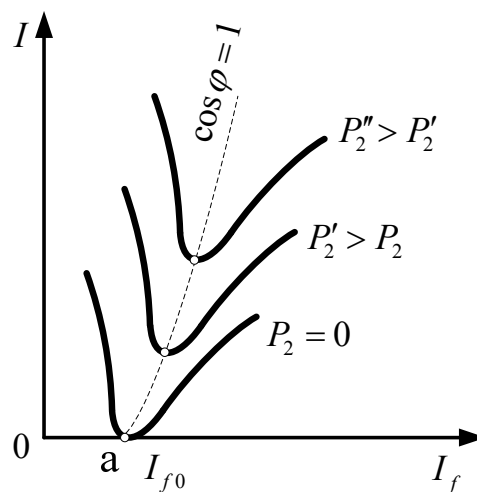
При увеличаване на възбудането нараства \dot{E}_0 и тъй като $\dot{U} = const$ токът на генератора нараства, като протича допълнителен индуктивен ток \dot{I}_L поради превъзбудането на генератора - фиг.18.2б.

При намаляване на възбудането \dot{E}_0 намалява и понеже $\dot{U} = const$ протича изравнителен капацитивен ток \dot{I}_c , който събран геометрично с активния ток \dot{I}_a , дава тока \dot{I} - фиг.18.2в.

Реакцията на котвата от капацитивния ток действа намагнитващо и компенсира намалението на възбудането под нормалното. Възбудането може да се намали до определена стойност, след която генераторът излиза от синхронизъм.

18.4. V - криви

Тези криви показват изменението на котвения ток I на синхронния генератор, паралелно включен към мрежата, в зависимост от възбудителния ток I_f при постоянна активна мощност $P_2 = const$ - фиг.18.2.



Фиг.18.2.

Тези криви (криви на Мордей) обикновено се снемат опитно. Те имат формата на латинската буква V, от където идва наименованието им. Непосредствено след синхронизиране и паралелно включване към мрежата машината работи в точка „а“ при $P_2 = 0$ и $\cos \varphi = 1$. Когато възбудителният ток намалява ($I_f \downarrow$), а съответно котвеният ток се увеличава ($I \uparrow$), синхронната машина получава индуктивна енергия от мрежата за довъзбудането си. Когато възбудителният и котвеният ток се увеличават ($I_f \uparrow, I \uparrow$), енергията е реактивна, но с обратна посока, в този случай синхронната машина отдава индуктивна енергия в мрежата. Ако се увеличи моментът M , той натоварва с активна мощност $P_2 > 0$. При изменение на възбудителния ток, се получават нови V – образни криви за тази активна мощност. В най-ниските точки на тези криви, котвеният ток е чисто активен и синхронният генератор работи при $\cos \varphi = 1$.

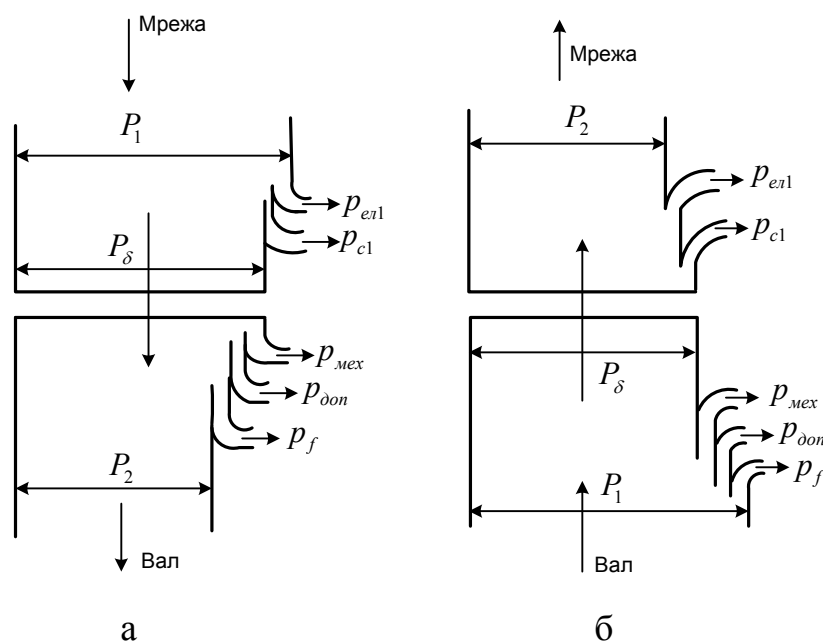
При по-големи мощности реакцията на активния ток на котвата се увеличава и нараства потокът на разсейването. За да се компенсира разсейването и да се получи пак $\cos \varphi = 1$, възбудането трябва малко да се увеличи. Затова минимумите на кривите не лежат точно един над друг, а се изместват надясно.

Въпрос 19

Синхронен двигател (СД). Мощност и момент. Работни характеристики

19.1. Синхронен двигател. Мощност и момент

При работа на синхронната машина като двигател водещо звено е магнитният поток, възбуден от статорната намотка, а индукторът изостава на някакъв ъгъл от него. Машината получава електрическа мощност от мрежата P_1 , а отдава механична мощност P_2 на работната машина. Диаграмите на мощностите при работа като двигател (а) и генератор (б) на синхронната машина са показани на фиг.19.1.



Фиг.19.1.

Загубите в отделните звена на синхронната машина, означени на фиг.19.1, са:

- p_{el1} - електрически загуби в котвената (статорна) намотка;
- p_{c1} - магнитни загуби в статорния стоманен пакет;
- $p_{мех}$ - механични загуби;

- $p_{\text{дон}}$ - допълнителни загуби от висшите хармоници на полето в полюсните накрайници и статорните зъби, от токовото изместване в статорната намотка и от вихровите токове породени от потоците на разсейване;

- p_f - загуби във възбудителната верига, включително и мощността на възбудителя.

Електромагнитната мощност P_δ на синхронния двигател е

$$P_\delta = P_1 - p_{\text{e1}} - p_{\text{c1}} = f(\Theta). \quad (19.1)$$

При работа като синхронен двигател $\Theta < 0$. Съгласно (17.5) и (17.7) това означава, че електромагнитната мощност, съответно момент добиват отрицателни стойности. Изменението на знака на P_δ е свързано с промяната на посоката на енергията. От формална гледна точка не е удобно при разглеждане на процесите в синхронния двигател да се работи с отрицателни мощности и моменти.

За получаване на аналитични изрази за електромагнитната мощност P_δ и електрическата мощност P_1 за синхронен двигател с положителна стойност е необходимо във формулите за синхронен генератор да се замени ъгъл (Θ) с ($-\Theta$), да се измени знакът на дясната част на уравнението и след това в този израз да се приеме, че ъгъл Θ е положителна величина. При пренебрегване на r_a , изразът за електромагнитната мощност P_δ на неявнополюсен двигател е

$$P_\delta = \frac{mE_0U_{\text{mp}}}{x_d} \sin \Theta, \quad (19.2)$$

а електромагнитната мощност P_δ на явнополюсен двигател е

$$P_\delta = \frac{mE_0U_{\text{mp}}}{x_d} \sin \Theta + \frac{mU_{\text{mp}}^2}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\Theta. \quad (19.3)$$

За определянето на мощността на вала P_2 на синхронния двигател е необходимо от електромагнитната мощност да се извадят загубите:

$$P_2 = P_\delta - p_{\text{mex}} - p_{\text{дон}} - p_f. \quad (19.4)$$

Електромагнитният момент M_δ се определя от

$$M_\delta = \frac{P_\delta}{\Omega_1}, \quad (19.5)$$

а моментът на вала на синхронния двигател е:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_1}, \quad (19.6)$$

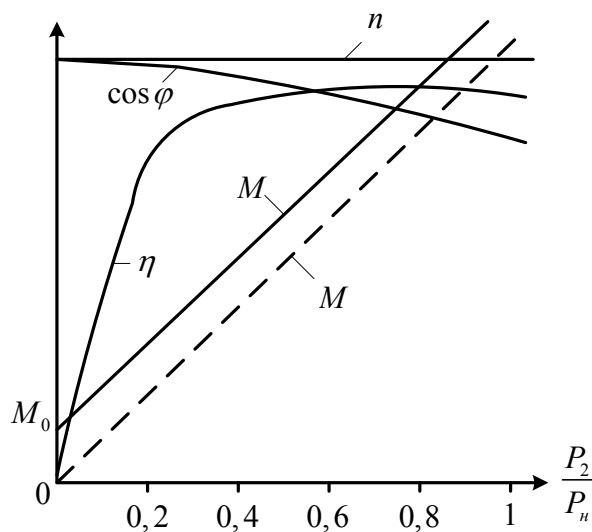
За опростяване на анализа може да се приеме, че $P_2 = P_\delta$, респ. $M_2 = M_\delta$.

19.2. Работни характеристики на синхронния двигател

Работните характеристики на синхронния двигател изразяват графично зависимостта на работните физични величини от натоварването при постоянно напрежение $U = const$ и при константен възбудителен ток $I_f = const$. Такива величини са скоростта на въртене n , въртящият момент M , факторът на мощността $\cos \varphi$, коефициентът на полезно действие, мощността от мрежата P_1 , токът I и др.

Под натоварване на двигателя се разбира полезната мощност P_2 , която той развива на вала си. Тя отговаря точно на извършваната полезна работа от двигателя.

Най-съществените работни характеристики са показани на фиг.19.2.



Фиг.19.2.

По работните характеристики могат да се преценяват качествата и възможностите на синхронните двигатели. Работните характеристики могат да се построят теоретично по разработени методи, в практиката работните характеристики се снемат опитно.

19.2.1. Скорост на въртене

Тази характеристика $n = f(P_2)$ е права линия, успоредна на абсисната ос, тъй като синхронизиращият момент не позволява скоростта на двигателя да се променя при изменение на товара. Разбира се, след превишаване на критичната мощност, двигателят изпада в неустойчив режим и излиза от синхронизъм, а скоростната характеристика пада до нула.

19.2.2. Полезен въртящ момент

Характеристиката $M_2 = f(P_2)$ е права наклонена линия, което следва от уравнението:

$$M_2 = \frac{P_2}{\Omega_1} = \frac{30P_2}{\pi n}. \quad (19.7)$$

Скоростта n е константна и затова моментът M_2 расте пропорционално с увеличението на полезната мощност P_2 . Характеристиката започва от началото на координатната система O , защото, когато полезната мощност P_2 е нула и полезният момент M_2 е нула.

При празен ход ($P_2 = 0$) двигателят развива момента на празен ход M_0 , необходим за преодоляването на загубите при празен ход (триене в лагерите, загуби от самовентилация и др.). Като се прибави моментът на празен ход M_0 към полезния въртящ момент M_2 , се получава характеристиката на общия въртящ момент M на двигателя.

19.2.3. Фактор на мощността

Видът на $\cos \varphi = f(P_2)$ зависи от големината на възбуждането (което в случая е константно). Обикновено се приема такъв възбудителен ток $I_f = const$, за който $\cos \varphi = 1$ при празен ход (т.е. при $P_2 = 0$). При нарастването на мощността P_2 , $\cos \varphi$ спада. Обяснението е следното:

С увеличаването на мощността P_2 се увеличава магнитният поток на разсейване. Двигателят започва да консумира индуктивен ток от мрежата. Именно индуктивната съставлява влошава $\cos \varphi$ на двигателя.

По тази характеристика се съди за естественото нарастване на потока на разсейване или все едно на индуктивното съпротивление на разсейване при увеличаването на натоварването. Иначе в експлоатацията възбудителният ток се регулира така, че при всяко натоварване $\cos \varphi$ да бъде единица или двигателят да работи превъзбуден и да подобрява $\cos \varphi_{mp}$.

на мрежата. Така синхронният двигател действа като кондензаторните батерии, служещи за подобряване на $\cos \varphi_{mp}$.

19.2.4. Коефициент на полезно действие

Характеристиката $\eta = f(P_2)$ има универсалния за всички електрически машини характер. Тя започва от началото на координатната система т.О, защото при $P_2 = 0$ двигателят не извършва полезна работа и $\eta = 0$. След увеличаването на полезната мощност, нараства и к.п.д. η . Механичните загуби при константните обороти остават постоянни, постоянни са и загубите в стоманата. К.п.д. достига максимум, след което започва да намалява поради това, че при по-големите натоварвания променливите загуби в медта $3I^2R_a$ нарастват толкова, че влошават к.п.д.

Ако възбуждането на двигателя се измени, се получава друга крива на к.п.д. С възбуждането се изменя и $\cos \varphi$. С възбуждането може да се поддържа $\cos \varphi$ равен на единица, с което се анулира реактивната съставляща на тока. При това полезната мощност остава същата, но се намаляват загубите в медта. Затова именно синхронният двигател може да има най-висок к.п.д. от всички останали машини за променлив ток, които не могат да работят при $\cos \varphi = 1$. Номиналният к.п.д. на съвремените синхронни двигатели е обикновено $92 \div 98 \%$.

Въпрос 20

Начини на пускане на синхронен двигател. Синхронен компенсатор

Синхронният двигател не може да се развърти самостоятелно до синхронна скорост при подаване на напрежение от захранващата мрежа. Неговият пусков момент е равен на нула. За да бъде пуснат в ход синхронният двигател, съществуват няколко начина.

20.1. Пускане чрез помощен двигател

Основният синхронен двигател е свързан механично със специален пусков двигател, обикновено асинхронен, който го развърта до честота на въртене, близка до синхронната. След това се подава възбудителен ток и се осъществява синхронизация подобно на тази при синхронните генератори. Понеже пусковият двигател има сравнително малка мощност спрямо развъртания синхронен двигател, този процес се осъществява при съпротивителен момент на задвижваната работна машина $M_c \approx 0$ през пусковия процес.

20.2. Честотно пускане

Синхронният двигател се захранва от отделен източник, на който честотата и напрежението плавно се променят (полупроводников статичен преобразувател или регулируем синхронен генератор). При това синхронният двигател е възбуден. Още при ниски честоти роторът се увеличава от въртящото се магнитно поле и е в синхронизъм с него. Този синхронизъм се поддържа през целия пусков процес, през който честотата на въртене $n = \frac{60f}{p}$ се променя непрекъснато до $n_n = \frac{60f_n}{p}$.

20.3. Асинхронно пускане

Това е най-разпространеният начин за пускане в ход на синхронните двигатели. При асинхронното пускане се създава значителен пусков момент, поради което синхронният двигател може да се пусне с определен съпротивителен момент. За да се осъществи асинхронно пускане е необходимо синхронният двигател да има пускова намотка, която е поставена в ротора, сходна с асинхронната машина. Пусковата намотка е със същата конструкция както успокоителната намотка на синхронните генератори. Асинхронното пускане се осъществява в следния ред.

Към статорната намотка се подава напрежение от захранващата мрежа. Протича ток и се възбужда въртящ се магнитен поток, който индуктира е.д.н. в пусковата намотка и съответно през нея протичат токове и се създава асинхронен въртящ момент. Роторът се завърта до подсинхронна скорост. Обикновено $s_0 = \frac{n_1 - n}{n_1} = 0,05$. През този интервал

възбудителната намотка трябва да е затворена през активно съпротивление 10÷12 пъти по-голямо от нейното собствено съпротивление. Не бива възбудителната намотка да бъде отворена, понеже ще се индуктират големи напрежения, които са опасни за изолацията.

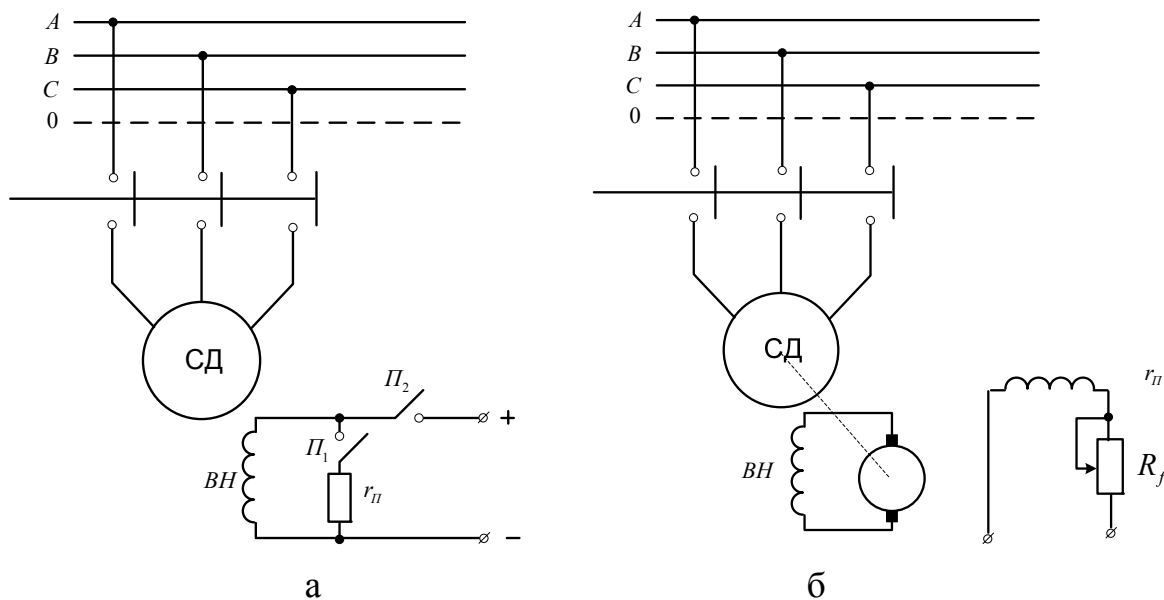
При достигане на честота на въртене $n_0 = 0,95n_1$ възбудителната намотка се включва към източник на постоянен ток, при което в индуктора се образуват полюси с постоянна полярност. Сега започва да действа и синхронен момент. Под неговото действие възникват периодични колебания на ъгловата скорост на ротора, при което се достига синхронната скорост на полето, а в някои случаи да бъде превишавана. След няколко колебания около нея роторът влиза в синхронизъм.

Асинхронното пускане на синхронните двигатели може да се осъществи по няколко схеми:

- директно включване към мрежата при пълно напрежение;
- включване чрез токоограничаващ реактор;
- включване чрез понижаващ автотрансформатор;

- честотно пускане чрез честотен преобразувател.

На фиг.20.1а е показана схема за развъртане на синхронен двигател. Възбудителната му намотка е затворена през резистора r_{II} . След достигане на хлъзгане $s = 0,05$ възбудителната намотка се включва, а r_{II} се изключва и двигателят автоматично влиза в синхронизъм.



Фиг.20.1.

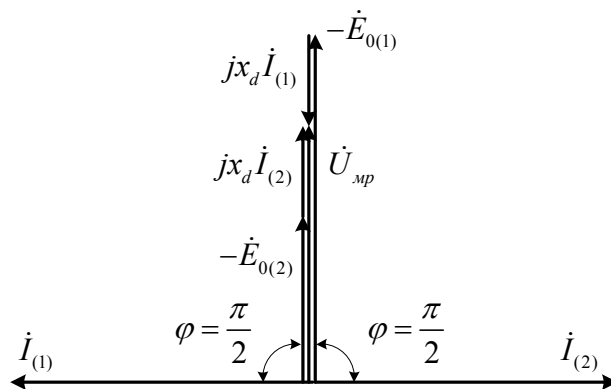
В схемата на фиг.20.1б възбудителната намотка е включена към котвата на възбудителя, който е на общ вал със синхронния двигател. В процеса на развъртане синхронният двигател се възбужда плавно и влиза в синхронизъм.

20.2. Синхронен компенсатор

Синхронна машина, включена в електрическата мрежа, която не е механично свързана с работна машина и не създава полезна механична мощност се нарича синхронен компенсатор. Той е предназначен за произвеждане на реактивна мощност, необходима за електроенергийната система. Използва се за подобряване на фактора на мощността в системата и за регулирането на напрежението в електропроводи.

По принцип синхронният компенсатор е синхронен двигател, който работи на празен ход и най-често е превъзбуден. Той консумира от захранващата мрежа съвсем малко активна енергия, за да покрива загубите си на празен ход и да поддържа въртенето си. В същото време, понеже е превъзбуден, той отдава на мрежата необходимата индуктивна енергия.

На фиг.20.2 е показана идеализираната векторна диаграма на синхронен компенсатор при пренебрегване на активната съставляща на статорния ток.



Фиг.20.2.

Когато компенсаторът е превъзбуден, токът $\dot{I}_{(1)}$ изпреварва напрежението \dot{U}_{mp} и компенсаторът консумира капацитивна реактивна енергия, т.е. отдава индуктивна енергия на мрежата.

Във втория случай, когато компенсаторът е недовъзбуден, токът $\dot{I}_{(2)}$ изостава от \dot{U}_{mp} и компенсаторът консумира индуктивна енергия от мрежата.

Обикновено синхронните компенсатори работят превъзбудени, като доставят индуктивна мощност в съответната мрежа с консуматори като асинхронни двигатели, трансформатори, електродъгови пещи и др. и освобождават електрическите централи и електропроводи от реактивния ток. Такава роля изпълняват и кондензаторните уредби, но предимството на синхронните компенсатори е, че при тях могат плавно да се изменят големината и знакът на реактивната мощност чрез изменение на възбудителния ток.

Когато в края на дълга електропреносна линия е включен синхронен компенсатор, той служи за регулиране на напрежението $U = const$. При голям индуктивен товар падът на напрежение в линията е най-голям. Тогава синхронният компенсатор трябва да работи превъзбуден. По този начин линията се освобождава от реактивния ток и съответно напрежението нараства. Обратно, при малък товар напрежението в края на линията може да се повиши. За да се поддържа напрежението константно, компенсаторът сега трябва да работи недовъзбуден, чрез което мрежата се натоварва с реактивен ток. Това увеличава пада в нея и стойността на напрежението намалява. Процесът на регулиране на напрежението се автоматизира. Тези свойства на синхронните компенсатори в съчетание на използване на трансформатори, регулирани под товар, могат да бъдат рационално използвани за поддържане на оптимални режими в електроенергийните системи.

Синхронните компенсатори имат явнополюсен ротор. Най-мощните компенсатори имат водородно охлаждане и работят на открито. Произвеждат се обикновено с мощност $S_n \leq 100\,000\text{ kVA}$.

Въпрос 21

Колебание и динамична устойчивост на синхронните машини

21.1. Колебание на синхронна машина

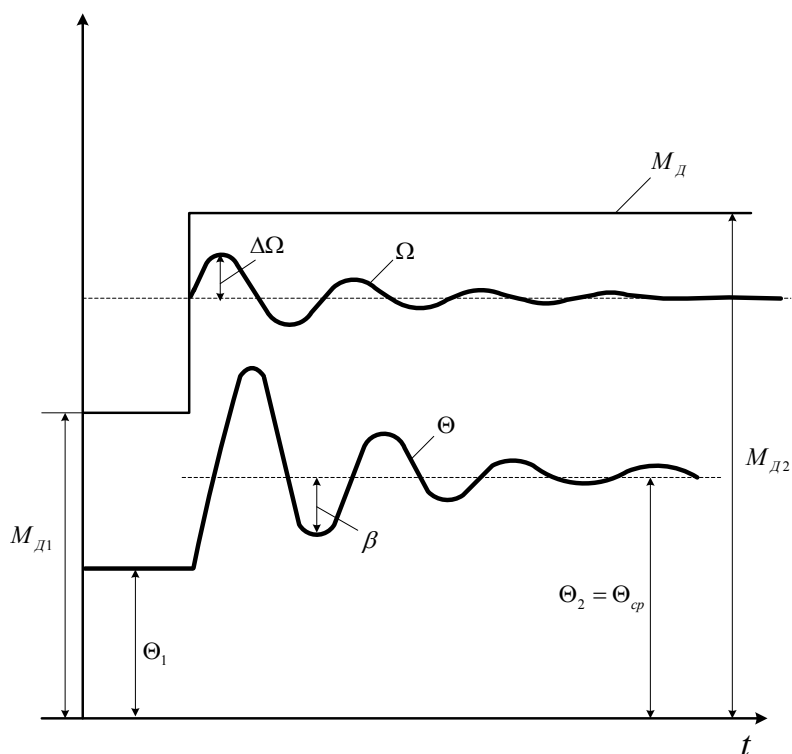
При всяка промяна на електрическия товар или на механичен момент на синхронната машина се изменя ъгъл Θ между векторите на напрежението \dot{U} и е.д.н. \dot{E}_0 .

Ако даден синхронен генератор работи на собствена мрежа, при изменение на двигателния момент или електрическата мощност индукторът ще се ускорява или забавя, а заедно с това ще се променят честотата, напрежението, ъгъл Θ и други величини. Следователно въртенето на ротора е свободно и неговата скорост ще се определя от действащите му моменти. Трябва да се отбележи, че условията на работа на синхронната машина в паралел с мощна електрическа мрежа, за която $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$ са други.

При промяна на двигателния момент или на електрическия товар, ъгловата скорост на потока на котвата Φ_a е неизменна, докато индукторът ще променя своята скорост и ще се нагажда на съответен ъгъл Θ .

Това преминаване от един ъгъл Θ_1 на друг Θ_2 не става мигновено, а е съпроводено с механични колебания на ротора.

Ако въртящият момент, приложен към вала на синхронната машина, рязко нараства от M_{d1} до M_{d2} и след това остава постоянен, ъгловата скорост Ω и ъгъл Θ ще се увеличат (фиг.21.1).



Фиг.21.1.

На нарастването на ъгловата скорост ще се противопоставят инерционният момент на въртящите се части, синхронизиращият момент и други спирачни моменти. Обикновено преминаването от Θ_1 към Θ_2 става чрез затихващи колебания, които се наричат люлеене на ротора - фиг.21.1. Ъгловата скорост на ротора Ω също се колебае около синхронната ъглова скорост Ω_1 .

Подобен колебателен процес възниква и при синхронен двигател, когато внезапно се измени приложеният към вала съпротивителен момент.

Колебанията се разделят на свободни (собствени) и принудени. Свободните колебания възникват в механични системи, в които действат еластични и инерционни сили, появяващи се смущения, извеждащи механичната система от равновесно състояние. Принудените колебания се пораждаат, ако външният момент приложен към вала периодично се променя, например при работа с машини имащи променлив инерционен момент (машини с коляно-мотовилкови механизми и др.).

Люлеенето оказва в различна степен нежелателно влияние върху устойчивата работа на синхронните машини. Ефикасна мярка срещу люлеенето на синхронните машини представлява успокоителната намотка. Понеже е поставена на индуктора и се върти заедно с него, успокоителната намотка не се пресича от магнитните силови линии на постоянния възбудителен поток Φ_f . Когато се върти синхронно, проводниците на успокоителната намотка не се пресичат и от силовите линии от потока на

котвата Φ_a . Когато при люлеене индукторът периодично избързва и се забавя, проводниците на успокоителната намотка периодично се пресичат от силовите линии на синхронно въртящият се поток Φ_a . Вследствие на това в проводниците на успокоителната намотка се индукира е.д.н., което прокарва токове. При взаимодействие на токовете с въртящото се магнитно поле възникват асинхронни моменти, които действат против колебанията. При синхронните двигатели успокоителната намотка се използва за асинхронното им пускане.

21.2. Динамична и статична устойчивост на синхронна машина

Работата на синхронните генератори в паралел е свързана с изменение на условията за синхронната паралелна работа, например изменение на товара, възникване на къси съединения в мрежата и др. От съществено значение е синхронните генератори да поддържат захранването, което е свързано със запазване на синхронната работа на генераторите.

Свойството на синхронния генератор да запазва синхронния си режим на работа при постоянен и променлив товар се нарича устойчивост на синхронен генератор. Устойчивостта не е еднаква при плавни и резки изменения на товара. Във връзка с това се различават два вида устойчивост – статична и динамична.

Статична устойчивост се нарича свойството на синхронния генератор да запазва синхронизма си при постепенни изменения на натоварването от нула до критичната мощност.

Динамичната устойчивост се нарича свойството на синхронния генератор да издържа на внезапни изменения на товара, без да излиза от синхронизъм.

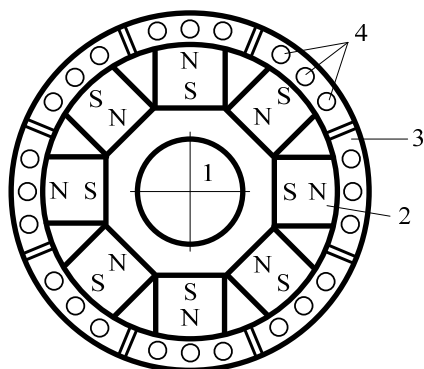
Въпрос 22

Синхронни машини с постоянни магнити. Реактивни синхронни двигатели

22.1. Синхронни машини с постоянни магнити

Приложението на постоянните магнити в електрическите машини за възбуждане на основното магнитно поле непрекъснато се разширява. Това се дължи на развитието на металургията и създаване на магнитни материали с голяма специфична енергия и постоянство на параметрите.

Постоянните магнити се разполагат обикновено в ротора, който може да има различни конструктивни изпълнения. На фиг.22.1 е показана класическа конструкция на ротор на синхронна машина с постоянни магнити.



Фиг.22.1.

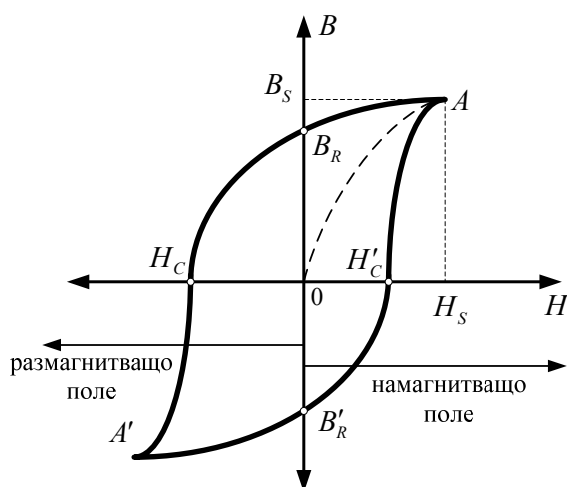
Роторът е явнополюсен. Постоянните магнити 2 са радиално разположени. Върху тях са поставени феромагнитни накрайници 3, в които има пускова кафезна намотка 4.

За изработване на постоянни магнити се използват магнитотвърди сплави: Fe-Ni-Al; Fe-Ni-Al-Cu; Fe-Ni-Al-Co.

Друга група постоянни магнити се получават по методите на праховата металургия, чрез пресоване на феромагнитни прахове и свързващо вещество: металокерамични, металопластични, оксидни.

Магнитотвърдите материали, използвани за постоянни магнити, имат широк хистерезисен цикъл $B = f(H)$ (фиг.22.2). Точка А с координати B_S и H_S е точката на магнитно насищане. OA е крива на първоначално намагнитване.

$B_R - H_C$ е крива на размагнитването. Тя е основна характеристика на постоянните магнити. Свойствата на материала се определят най-вече от стойностите на остатъчната магнитна индукция B_R и коерцитивния интензитет H_C .



Фиг.22.2.

Магнитната верига на синхронните електрически машини с постоянни магнити е съставена от постоянни магнити, магнитомеки материали и въздушна междина. Освен полезния магнитен поток, който преминава през работната въздушна междина, съществува и магнитен поток на разсейване.

Изчислението на магнитна верига с постоянни магнити означава определяне на размерите и материала, от които се изработват постоянните магнити при зададена стойност на магнитния поток във въздушната междина и зададени размери и криви на намагнитване за останалите участъци от магнитната верига.

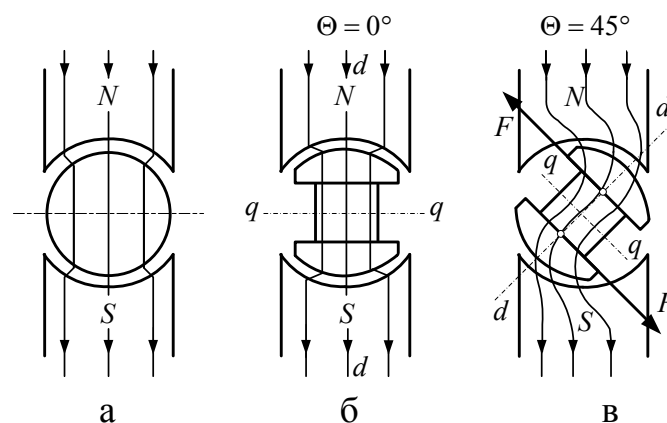
22.2. Реактивни синхронни двигатели

От уравнение (17.5) се вижда, че явнополюсната синхронна машина е в състояние да развива мощност при синхронен режим на работа и възбудителен ток $I_f = 0$. В този случай уравнението на нейната ъглова характеристика е

$$P_\delta = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right) \sin 2\Theta. \quad (22.1)$$

Синхронна машина, която няма възбудителна намотка, се нарича реактивна, понеже нейното магнитно поле се възбужда от реакцията на тока на котвата. На това се дължи ниският $\cos \varphi$ на тази машина. От уравнение (22.1) се вижда, че реактивната синхронна машина развива максимална мощност, респ. максимален момент при $\Theta = 45^\circ$. Следователно нейната работа е устойчива в границите на изменение на ъгъл Θ от 0 до 45° .

В явнополюсната машина роторът се стреми да заеме спрямо въртящото се магнитно поле такова положение, за което съпротивлението на магнитния поток да е минимално. Ако $M_c = 0$, ъгъл $\Theta = 0$ и електромагнитният момент също е нула - фиг.22.3б.



Фиг.22.3.

При натоварване на вала оста на полюсите се отклонява от оста на статорния поток на ъгъл Θ и се създава електромагнитен момент - фиг.22.в.

В машина с цилиндричен ротор магнитното съпротивление на въздушната междина е еднакво в отделните радиални посоки и не се създава реактивен момент - фиг.22.3а.

Реактивните двигатели се пускат в движение по метода на асинхронното пускане. Влизането в синхронизъм става благодарение на реактивния момент. В практиката намират приложение трифазни и еднофазни реактивни двигатели. Последните имат пускова намотка с пусков кондензатор, както при еднофазните асинхронни двигатели.

Въпрос 23

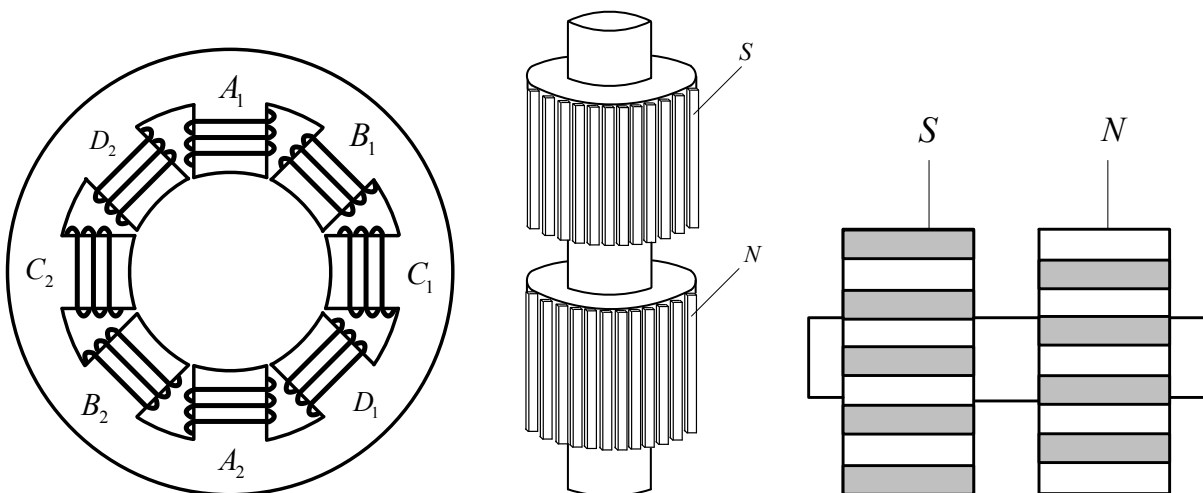
Стъпкови двигатели. Синхронни тахогенератори

23.1. Стъпкови двигатели

Стъпковите двигатели представляват синхронни микродвигатели, при които захранването на статорните намотки се осъществява с импулсно напрежение, най-често електронен комутатор изпълнен с транзистори.

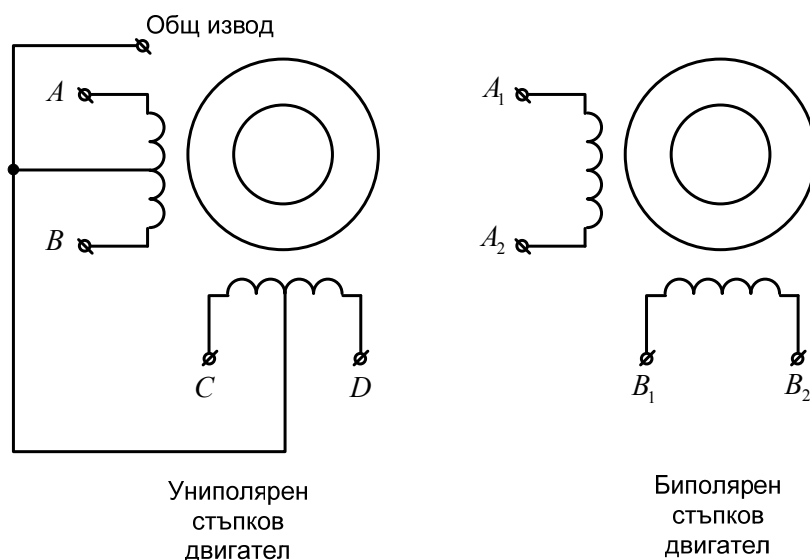
Под въздействие на всеки импулс роторът прави преместване, наречено стъпка.

В стъпковите двигатели съществува позиционна обратна връзка на ротора спрямо статора, чрез която се осъществява управлението му. Конструкцията на ротора представлява два назъбени диска съответно за N и S полюсите, като двата диска се разминават с един зъб (фиг.23.1). Статорът се изработва от ламели от магнитно мек материал и има явнополюсна конструкция, на която има разположени бобини, и всяка от тях представлява електромагнит.



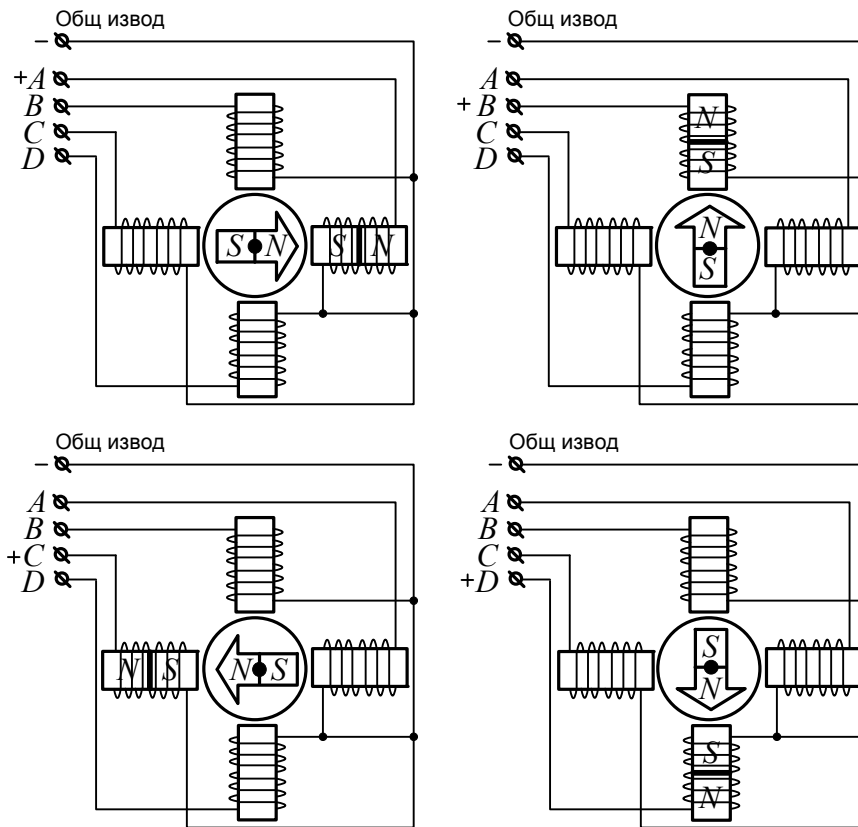
Фиг.23.1.

Посоката на магнитното поле на бобините зависи от поляритета на подаденото напрежение. Взаимодействието на магнитните полета на бобините и постоянните магнити предизвиква завъртане на оста в определена посока в зависимост от начина на подаване на напреженията. Има два вида стъпкови двигатели - униполярни и биполярни. Разликата в намотките е показана на фиг. 23.2.



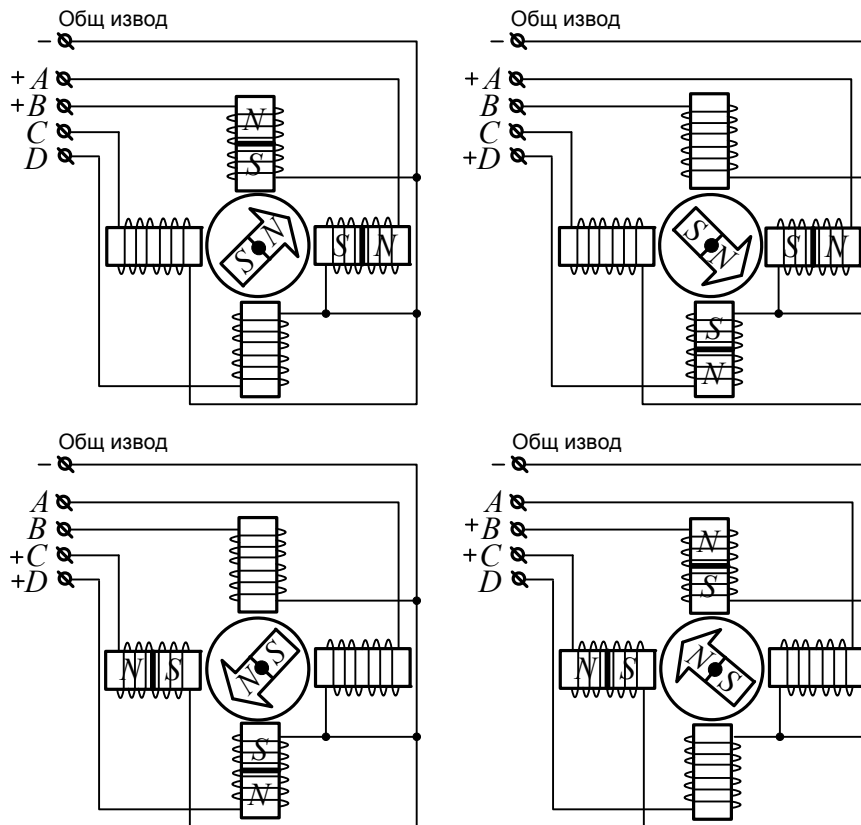
Фиг.23.2.

При униполярните стъпкови двигатели средният край на намотките е свързан в общ извод и е изведен отвън. При този вид двигатели управлението се осъществява, като общият извод се включва към единия полюс на захранващото напрежение, а на останалите изводи се подава поединично другият полюс. Управляващият драйвер редува намотките и така се получава движението на ротора. На фиг.23.3 е показана последователността на превключване при четири намотки в статора.



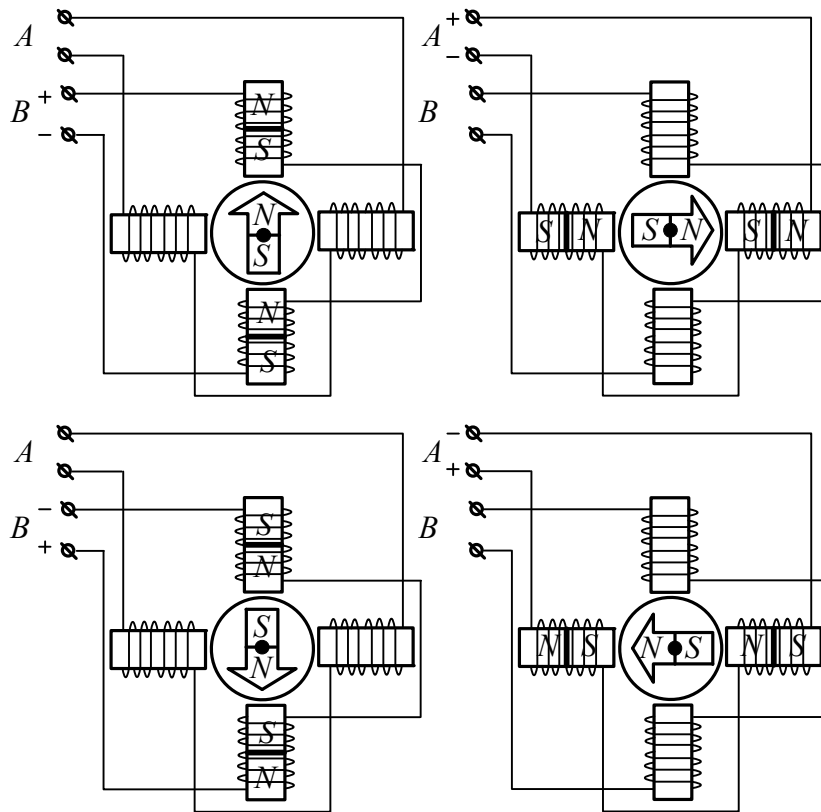
Фиг.23.3.

Тъй като напрежението, което се използва е само с една и съща полярност за всяка бобина двигателят се нарича униполярен. Броят на стъпките може да се удвои, ако подаваме напрежение едновременно на две съседни бобини. Така роторът застава в междинно положение и може да бъде позициониран по средата. При този режим на управление в един и същ момент имаме захранени по две бобини и въртящият момент е по-голям (фиг.23.4).

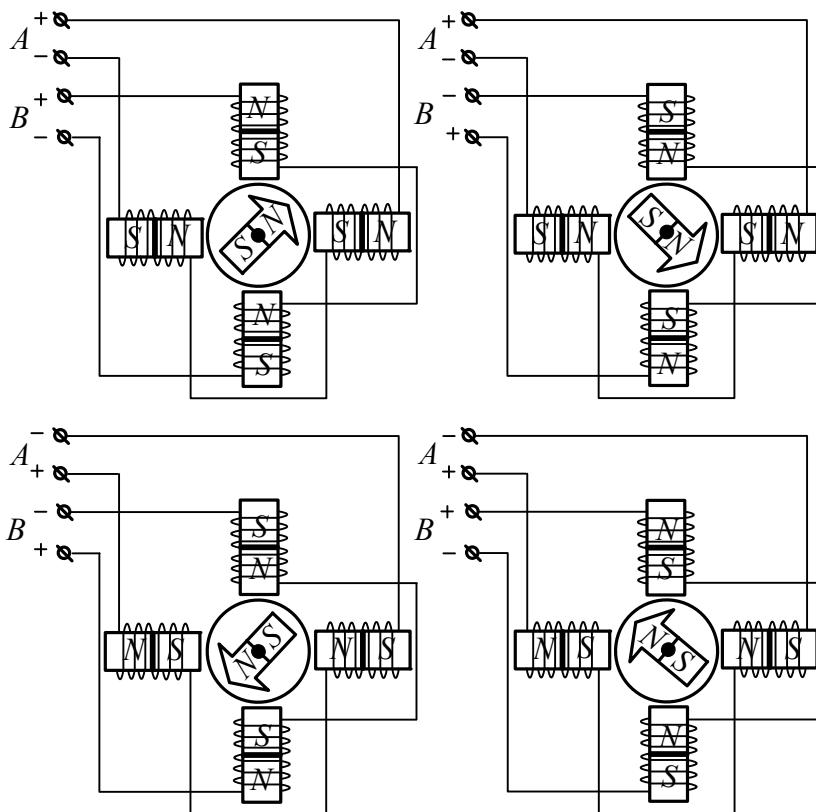


Фиг.23.4.

При биполярните двигатели има две бобини, като всяка от тях е съставена от по две части разположени една срещу друга. Характерно е, че магнитната сила, която действа на ротора се получава едновременно от двете срещуположни части, което обуславя по-голям въртящ момент. Друга съществена разлика е, че в процеса на управление се променя полярността на напрежението, което се подава на бобините. Затова тези двигатели се наричат биполярни. На фиг. 23.5 са показани възможните състояния на ротора при съответната полярност на подаваните напрежения. А на фиг.23.6 са показани тези състояния при едновременно захранване на две съседни бобини.



Фиг.23.5.



Фиг.23.6.

23.2. Синхронни тахогенератори

Синхронните тахогенератори представляват най-често еднофазни синхронни машини, роторът на които се изпълнява от постоянни магнити. Статорът е направен от електротехническа стомана. Роторът е явно полюсен, просто магнит. В каналите е поставена статорна намотка. При въртене на ротора в статорната намотка се индукира електродвижещо напрежение.

$U_{изх} = f(n)$ – представлява външната характеристика, която е най-важната характеристика за всеки тахогенератор. Стремежът е характеристиката да бъде по-линейна.

Изходната характеристика на практика не е линейна, това се обяснява с изменението на честотата на електродвижещото напрежение. Когато се изменя честотата на въртене се изменят индуктивните съпротивления. Това е причина синхронните тахогенератори да не намират широко приложение. Качествата се подобряват, когато се включи полупроводников изправител.

Въпрос 24

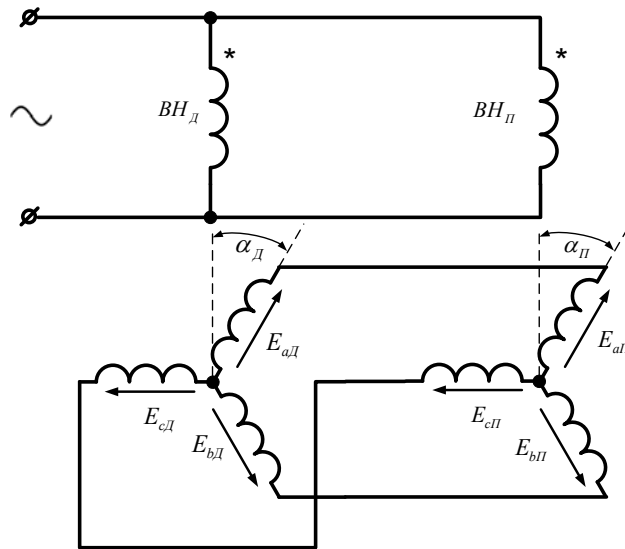
Селсини. Завъртащи трансформатори. Безконтактни селсини.

24.1. Селсини

Селсините се използват за синхронно завъртане на две или повече оси, които не са свързани помежду си механично. Те се използват в системите за регулиране и контрол. Понастоящем се използват изключително еднофазни селсини.

В статора на еднофазния селсин има намотка, която се нарича възбудителна. В каналите на ротора са разположени три намотки. Осите им са изместени една от друга на 120° . Трите намотки са свързани в звезда и образуват т.нар. синхронизираща намотка на селсина. Трите извода на намотките са изведени чрез контактни пръстени и четки. Статорът и роторът са набрани от листовата ламарина, защото работният поток е променлив.

Съгласно предназначението си селсините работят свързани най-малко два в схема. Най-простата схема на свързване е показана на фиг.24.1.



Фиг.24.1.

Единият селсин играе ролята на датчик и се нарича селсин-датчик Д. Той управлява другия селсин, който се нарича селсин-приемник П. Селсините трябва да са с еднакви параметри. Селсините приемници могат да бъдат повече от един.

Възбудителните намотки на селсините са включени към обща захранваща система. Синхронизиращите намотки на селсините се свързват помежду си, както е показано на фиг.24.1. Пулсиращите полета на възбудителните намотки индуцират е.д.н. в синхронизиращите намотки. Ако роторите на датчика и приемника заемат еднакво положение спрямо осите на възбудителните намотки, т.е. $\alpha_D = \alpha_P$, в свързаните една с друга фази на синхронизиращите намотки на датчика и приемника се индуцират еднакви е.д.н., т.е.

$$E_{aD} = E_{aP}, E_{bD} = E_{bP}, E_{cD} = E_{cP}. \quad (24.1)$$

Тези е.д.н. се уравновесяват взаимно и през синхронизиращите намотки не протича ток. Следователно не се създават електромагнитни въртящи моменти. Това положение на селсините се нарича съгласувано.

Ако роторът на датчика се завърти на друг ъгъл, той излиза от съгласуваното положение. Равенството на е.д.н. се нарушава. През синхронизиращите намотки и свързващите ги проводници протичат токове. От взаимодействието на тези токове и възбудителния магнитен поток възниква въртящ момент. Роторът на селсина-приемник се завърта дотогава, докато дойде в съгласувано положение. По такъв начин се създава дистанционното предаване на ъгъла на завъртане.

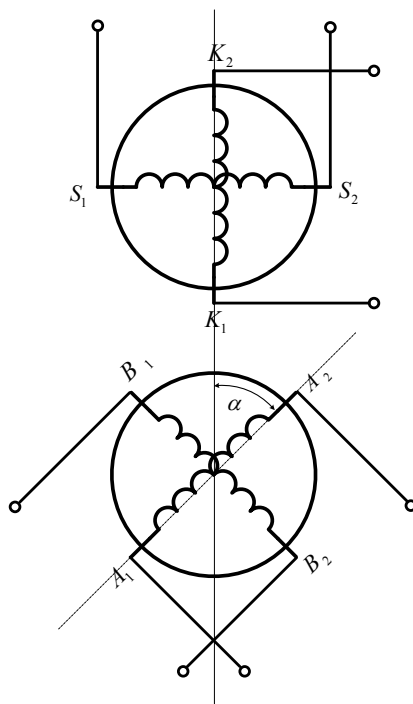
Триещите се четки в контактните пръстени имат отрицателни въздействия в работата на селсините и внасят грешка от механично триене в селсина-приемник. Второ, контактните съпротивления предизвикват

падове на напрежения, поради което равновесното положение настъпва при по-малки е.д.н. в синхронизиращата намотка на селсина-приемник, т.е. при по-малък ъгъл α_{II} .

24.2. Завъртащи трансформатори

По своето устройство завъртащите трансформатори са подобни на асинхронните двигатели с навит ротор. Статорът и роторът са набрани от щанцовани дискове от електротехническа стомана и имат канали, в които се влагат намотките. Обикновено на статора и на ротора се поместват по две намотки, чиито оси са изместени помежду си на 90 електрически градуса. Роторът има контактни пръстени и четки, осъществяващи галваничната връзка с намотките му.

На фиг.24.2 са показани принципните схеми на статора и ротора на завъртащ се трансформатор. Тук S е главната статорна намотка, K - спомагателната статорна намотка, A - синусната роторна намотка, B - косинусната роторна намотка. Роторът може да се завърта с помощта на редукторен механизъм на произволен ъгъл α спрямо статора. Редукторът има скала за отчитане на ъгъла на завъртане и е свързан с вала посредством твърд съединител.



Фиг.24.2.

Принципът на действие на завъртащия се трансформатор е следният. Да допуснем, че главната статорна намотка S е включена към източник на променливо напрежение U , чиято ефективна стойност остава постоянна величина. Намотката K е отворена. Протичащият през намотката S ток

възбужда магнитен поток Φ_S , който преминава и през ротора. При ъгъл $\alpha = 0$ този поток ще индуктира е.д.н. само в роторната намотка B , чиято ос съвпада с оста на статорната намотка S . В роторната намотка A няма да се индуктира е.д.н., понеже нейната ос е перпендикулярна на статорната намотка S . Ако обаче роторът се завърти на ъгъл α , както в намотката A , така и в намотката B ще се индуктира е.д.н., които ще бъдат съответно:

$$E_A = 4,44 f w_A k_{w_A} \Phi_S \sin \alpha, \quad (24.2)$$

$$E_B = 4,44 f w_B k_{w_B} \Phi_S \cos \alpha. \quad (24.3)$$

От горните равенства следва, че е.д.н., което се индуктира в роторната намотка A , е пропорционално на синуса на ъгъла на завъртане, а това в намотка B - на косинуса на ъгъла на завъртане. От където следва и наименованието на тези намотки. Тази зависимост на роторните е.д.н. от ъгъла на завъртане е валидна само когато завъртащият се трансформатор е в режим на празен ход. При натоварване, т.е. при включване във веригите на роторните намотки консуматори, протичащият ток създава своя реакция на тока на котвата, която е причина за нарушаване на пропорционалността между E_A и $\sin \alpha$, както и E_B и $\cos \alpha$. Изходното напрежение на завъртащия трансформатор трябва строго да се изменя по синусен или косинусен закон от ъгъла на завъртането. Поради това се прибягва до симетриране, т.е. отстраняване на грешката от реакцията на котвата посредством компенсрането ѝ. Това става, като се натовари втората роторна намотка (вторично симетриране) или втората статорна намотка (първично симетриране).

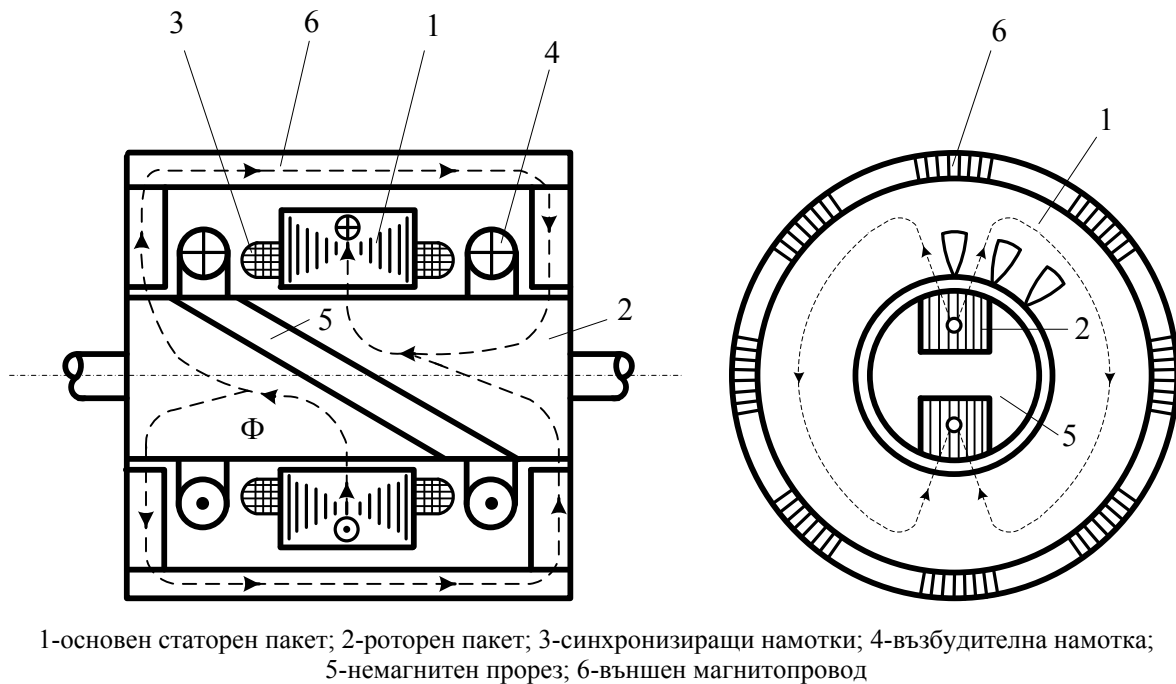
24.3. Безконтактни селсини

Безконтактните селсини имат една възбудителна еднофазна намотка и една синхронизираща трифазна намотка, както е при контактните селсини. Двете намотки (еднофазната и трифазната) са разположени върху статора, така че в случая не са нужни контактни пръстени. Устройството на безконтактните селсини е показано на фиг.24.3.

Роторът на селсина 2 представлява два пакета, които са набрани от електротехническа стомана. Пакетите се разделят от наклонен прорез 5, запълнен с немагнитен материал. Листовете, от които са набрани роторните пакети, са успоредни на вала. Пакетите са запресовани в пластмаса и след това са обработени във вид на цилиндър.

Статорът на машината се състои от основен пакет 1, в чиито канали е вложена трифазната разпределена синхронизираща намотка 3 и външен магнитопровод 6. Пакетите на външния магнитопровод са набрани от

пластини електротехническа стомана, успоредни на оста на вала и залети във външното цилиндрично тяло, което е от алуминий.



Фиг.24.3.

Еднофазната възбудителна намотка 4 представлява две последователно свързани пръстеновидни бобини, които обхващат ротора.

Принципът на работа на безконтактния селсин може да се изясни, ако се проследи пътят на магнитния поток на възбудителната намотка. Нека в даден момент посоката на тока във възбудителната намотка е показаната на фиг.24.3. Възбуденият от него магнитен поток се затваря около възбудителната намотка, като преминава аксиално на ротора (дясната част) до достигане на немагнитната междина 5, след това променя посоката си, преминава през въздушната междина отгоре, лявата част на ротора, външния магнитопровод. По такъв начин магнитната верига се затваря. В резултат на това във въздушната междина между статора и ротора се получава магнитно поле, подобно на възбудителното поле на контактния селсин. При завъртане на ротора се завърта и магнитният поток. В трите фази на синхронизиращата намотка се индуцират е.д.н., които зависят от положението на ротора. Следователно работата на безконтактния селсин е аналогична на работата на контактните.

Недостатъци на безконтактния селсин са сложната му конструкция, двойната въздушна междина в магнитната верига и по-големите размери и маса.

Въпрос 25

Изпълнителен двигател за постоянен ток. Тахогенератор за постоянен ток. Специални постояннотокови генератори

В зависимост от предназначението си в устройствата за автоматично регулиране постояннотоковите машини с малка мощност биват два вида. Първите са основни и се наричат изпълнителни. Те привеждат в действие командите на управлението или ги подготвят. Вторите са помощни и се наричат силови. Те се използват за електрическо задвижване на отделни възли или механизми в автоматизирани системи.

Изпълнителните постояннотоковите машини се разделят на изпълнителни постояннотокови двигатели и постояннотокови тахогенератори. Изпълнителните двигатели превръщат подавания към тях сигнал в механично преместване. Те биват с котвено и полюсно управление в зависимост от това на коя намотка се подава управляващият сигнал. Постояннотоковите тахогенератори преобразуват механичната скорост на вала си в електрически сигнал.

25.1. Изпълнителен двигател за постоянен ток с котвено управление

При този двигател възбудителният ток се поддържа константен. На котвената намотка се подава управляващото напрежение. Понеже възбудителната намотка е непрекъснато включена, двигателя е готов да се задейства без забавяне от преходния процес във възбудителната намотка. При подаване на сигнал $U_y \neq 0$ през котвата протича ток I_y и тя се завърта със съответната скорост. Отношението на управляващото напрежение към възбудителното се нарича коефициент на сигнала:

$$\alpha = \frac{U_y}{U_g}. \quad (25.1)$$

Коефициентът на сигнала, при който котвата започва да се върти, изразява относителната стойност на напрежението на тръгване. Механичните характеристики на тези двигатели дават връзката между скоростта и въртящия момент, а регулиращите показват зависимостта на скоростта на въртене и коефициента α .

Най-голямото преимущество на изпълнителните двигатели за постоянен ток е, че механичните и регулировъчните характеристики са линейни. Най-същественят недостатък е, че изискват голяма мощност на управляващия сигнал.

Широко се използват изпълнителни двигатели с постоянни магнити. Имат проста конструкция, по-малко тегло, по-добър к.п.д. и по-малко

прегриват. Недостатък на тези двигатели е високата цена. Сплавите на постоянните магнити съдържат скъпи метали - никел, кобалт, ванадий и др.

25.2. Изпълнителен двигател за постоянен ток с полюсно управление

При този двигател напрежението на котвата се поддържа константно $U_a = const$. На възбудителната намотка се подава управляващото напрежение U_y . С изменение на управляващото напрежение се достига желаната скорост. Тъй като котвената намотка е непрекъснато включена към мрежата, през двигателя винаги протича котвеният ток I_a . Така двигателят е готов при появата на възбудителен поток да се задейства. За да не се развърта с опасно голяма скорост при анулиране на потока Φ_y и празен ход, обикновено на вала на този двигател има постоянно приложен съпротивителен момент.

Най-ценното качество на изпълнителните двигатели с полюсно управление е малката необходима мощност на управляващия сигнал. Най-големият и сериозен недостатък на двигателите с полюсно управление е, че имат нелинейни регулировъчни характеристики.

Техен общ недостатък с двигателите с котвено управление е наличието на колектор.

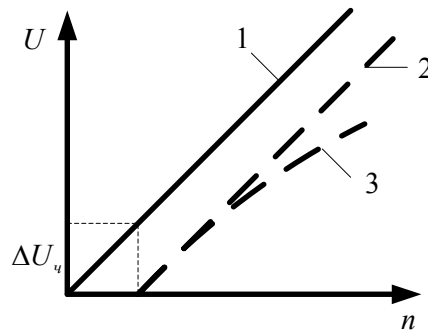
25.3. Тахогенератор за постоянен ток

Постояннотоковият тахогенератор представлява маломощен колекторен генератор. Чрез неговото напрежение се определя или измерва скоростта на вала, който го задвижва. Повечето тахогенератори имат конструкцията на обикновените генератори за постоянен ток с независимо възбуждане. Те се възбуждат или чрез постоянни магнити, или от възбудителна намотка, захранвана от страничен източник. Към изводите на котвата им се свързва измервателно устройство.

Основна характеристика на постояннотоковите тахогенератори е изходната характеристика. Тя изразява графично зависимостта на напрежението на тахогенератора U от скоростта на въртене n , т.е. $U = f(n)$ при $I_s = const$. Видът на характеристиката е показан на фиг.25.1.

Характеристиката 1 е идеалната изходна характеристика, а характеристиката 2 е действителната. Действителната характеристика не започва от началото на координатната система поради пада в четките ΔU_c от преходното съпротивление. Изходните характеристики са линейни, само когато включеното измервателно устройство има много голямо вътрешно

съпротивление (от порядъка на $10\,000\ \Omega$). При включване на по-малки съпротивления характеристиката става нелинейна - крива 3.



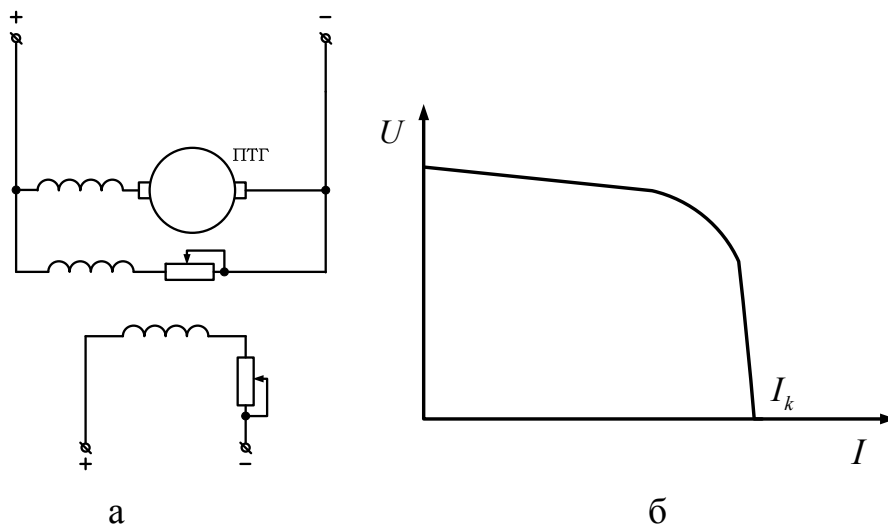
Фиг.25.1.

Постояннотоковите тахогенератори намират приложение и в автоматичните системи за осъществяване на обратна връзка. Обикновено се правят за скорости до $10\,000\ \text{min}^{-1}$. Маломощните тахогенератори са за $3 \div 5\ V$, а тези с по-голяма мощност - за $50 \div 100\ V$.

25.4. Специални постояннотокови генератори

25.4.1. Генератор с три възбудителни намотки

Това е генератор със смесено възбуждане, на полюсите на който се поставя трета намотка с независимо възбуждане - фиг.25.2а.



Фиг.25.2.

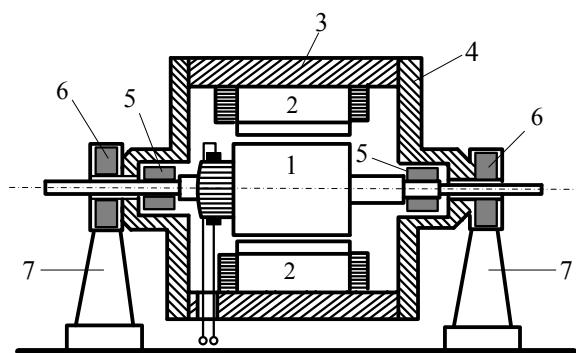
Последователната възбудителна намотка е включена противоположно на намотките с паралелно и независимо възбуждане. Вследствие на размагнитващото действие на последователната намотка, външната характеристика на генератора е стръмно падаща (от известна стойност на тока на котвата) - фиг.25.2б.

Такъв генератор може да се използва за електрозаваръчен генератор. Намира също така приложение в електрическите локомотиви като тягови двигатели.

25.4.2. Електромашинен динамометър

Това е електрическа машина за измерване на въртящ момент на други машини. Познат е и като пенделмашина.

Електромашинният динамометър има две двойки лагери, на които се крепят котвата и индуктора - фиг.25.3.



1-котва; 2- полюси; 3-ярем на индуктора; 4-лагерни щитове; 5-лагери на котвата; 6-лагери на индуктора и на машината; 7- лагерни стойки

Фиг.25.3.

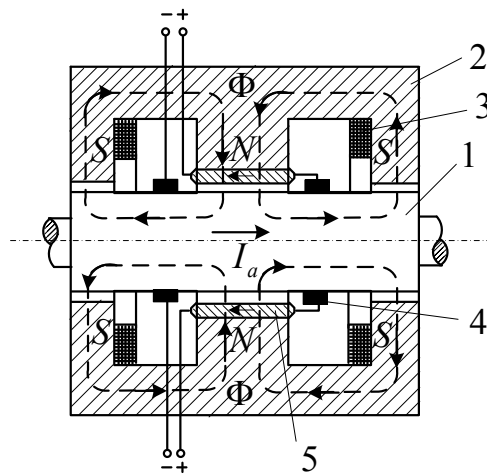
Котвата е съединена с изпитваната машина и се върти. Индукторът може да се завърта свободно до определен ъгъл, ограничен от неподвижни опори. Този ъгъл зависи от големината на измервания въртящ момент.

На индуктора се придава същият въртящ момент както на котвата, но в обратна посока. Този момент чрез система от лостове се предава и измерва от специална кантарна система. Внася се определена грешка от измерването, която се дължи на триенето в лагерите на индуктора и на част от вентилационните загуби.

25.4.3. Униполяр генератор

За получаването на постоянен ток с много голяма стойност при ниско напрежение $1 \div 50 V$, се използват униполярни генератори. На фиг.25.4 е показана принципна конструкция на униполяр генератор. Масивният стоманен цилиндър се върти в магнитното поле, което се възбужда от постоянен ток, който преминава през неподвижните пръстеновидни възбудителни намотки.

Котвената намотка представлява масивното тяло на ротора. Токът от ротора се отвежда чрез четки. За компенсиране на полето на реакцията на котвата служи компенсационната намотка.



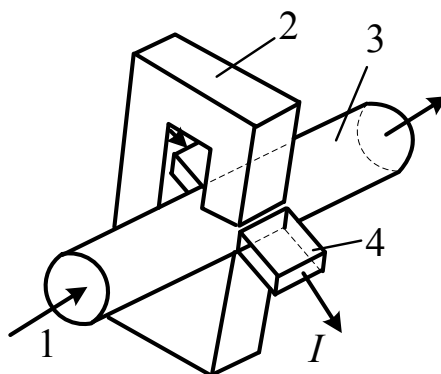
1-стоманен цилиндър (котва); 2-масивен магнитопровод на статора; 3-възбудителна намотка; 4-четки;
5-компенсационна намотка

Фиг.25.4.

Използването на униполярни генератори за свръх големи токове се ограничава от трудностите, които възникват при конструирането на четковия апарат за такива токове, както и от големите механични и електрически загуби, които се отделят в четковите контакти.

25.4.4. Магнитохидродинамични машини

В магнитохидродинамичния постоянен ток генератор - фиг.25.5, през канала 3 преминава електропроводяща течност или газ 1. Електромагнитът 2, който създава магнитното поле, се захранва от постоянен ток от независим източник. Полето индуцира е.д.н. в течността или газа, а протичащият ток се отвежда чрез електродите 4.



1-течен метал; 2-електромагнит; 3-канал; 4-електроди

Фиг.25.5.

Електромагнитните помпи за течен метал са също магнитохидродинамични машини, чиято принципна схема е като на фиг.25.5. В канала 3 има течен метал. Чрез електродите 4 през метала

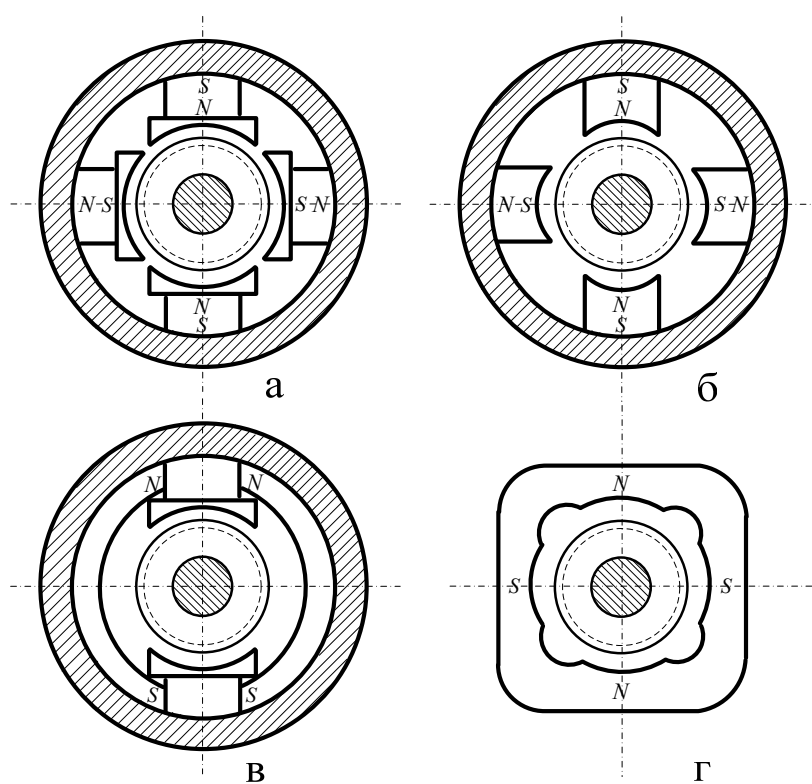
протича ток. Възбуждането се осъществява от електромагнита 2. При взаимодействието на магнитното поле и протичащият през метала ток се образува сила привеждаща метала в движение.

Въпрос 26

Специални постояннотоккови машини с постоянни магнити. Високомоментни ПТМ

26.1. Специални постояннотоккови машини с постоянни магнити

Магнитното поле на тези машини се възбужда от постоянни магнити. На фиг.26.1 са показани различни магнитни системи с постоянни магнити.



а-радиални постоянни магнити с полюсни крайници от електротехническа стомана; б-радиални постоянни магнити; в-тангенциални постоянни магнити; г-пръстеновиден магнит

Фиг.26.1.

За да се намали размагнитващото действие на реакцията на котвата се използват магнити с висока коерцитивна сила. В по-мощните двигатели се прилага комбинирано възбуждане - постоянни магнити и възбудителна намотка. Така е възможно регулирането и на магнитния поток в определени граници.

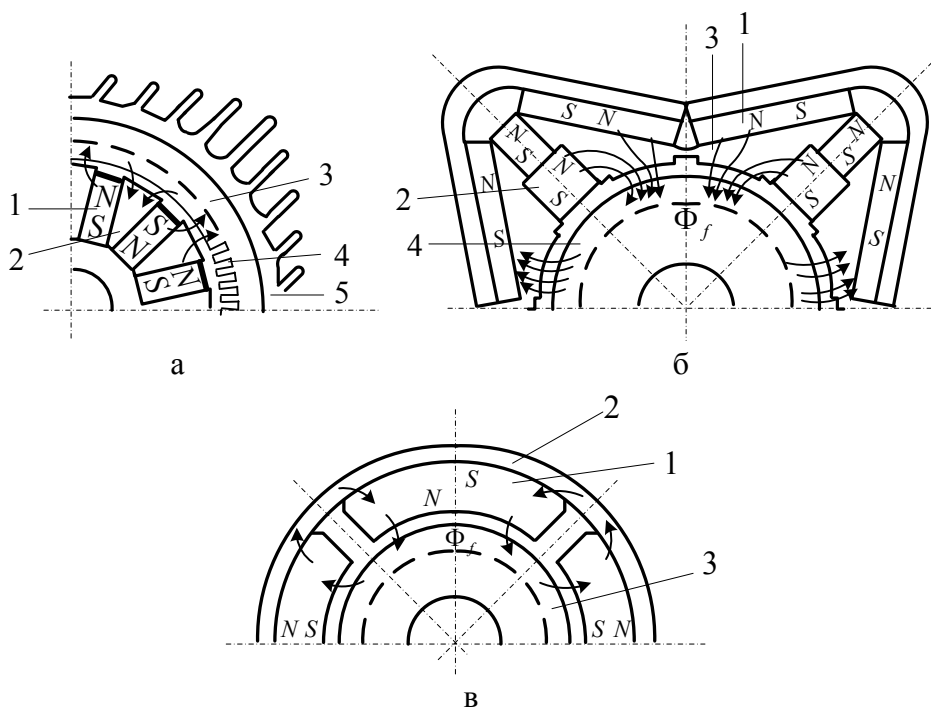
26.2. Високомоментни машини за постоянен ток

Разработени са двигатели за постоянен ток с постоянни магнити осигуряващи голяма претоварваща способност. Тези двигатели се наричат високомоментни. Към тези двигатели се предявяват редица изисквания, като широк диапазон на регулиране на скоростта, висока надеждност, осигуряване на необходимата претоварваща способност при много ниски скорости и др. Възможни са два вида конструкции на тези двигатели:

- нормална конструкция - котвата и колекторът се въртят, а индукторът от постоянни магнити е в статора;
- обърната конструкция - котвата и колектора са неподвижни, а се въртят четките към колектора и индуктора.

Създаването на много големи моменти в тези двигатели се дължи както на електронна система за управление на двигателя, така и на оптимизираната магнитна система, в която магнитното поле се възбужда от постоянни магнити с високи стойности на специфичната магнитна енергия, коерцитивна сила и др.

На фиг.26.2 са показани три конструкции на магнитните системи на високомоментни двигатели за постоянен ток.



Фиг.26.2.

На фиг.26.2а постоянните магнити 1 са в ротора (обърната конструкция). Магнитният поток Φ е показан условно със стрелки. От постоянните магнити потокът преминава през полюсите от магнитно мек материал, т.нар. концентратори 2 и въздушната междина, и се затваря в

статора - каналнозъбна зона 4 и статорен ярем 3. Позиция 5 е корпусът на машината.

На фиг.26.2б в статора се намира индукторът, който се състои от тангенциални магнити 1, радиални постоянни магнити 2 и полюси (концентратори) 3 от магнитно мек материал. Котвата 4 е в ротора.

На фиг.26.2в е показана конструкция със сегментни постоянни магнити 1 в статора. Магнитният поток преминава през котвата 3 и корпуса на статора 2.

Въпрос 27

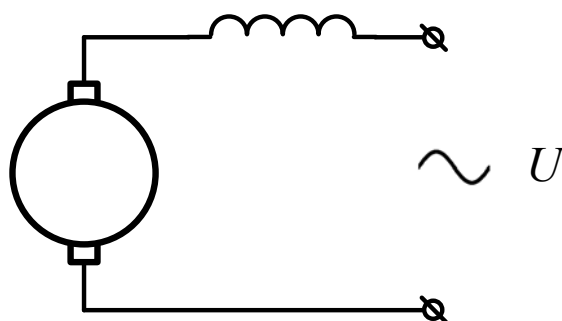
Еднофазни колекторни двигатели - индуктиране на е.д.н., въртящ момент, комутация. Репулсионни двигатели

Колекторните променливотокови машини съчетават възможностите на постояннотоковите и променливотоковите машини. При тях могат да се регулират в широки граници честотата на въртене n и факторът на мощността $\cos\varphi$. Изпълняват се като еднофазни и трифазни машини. Обикновено работят като двигатели. Те са по-сложни и по-скъпи от постояннотоковите двигатели (1,5÷2 пъти), и от асинхронните (3÷5 пъти). Тяхната мощност и диапазон на регулиране се ограничава от условията на комутация.

27.1. Еднофазни колекторни двигатели- индуктиране на е.д.н., въртящ момент, комутация

Еднофазните колекторни двигатели се разделят на две основни групи: еднофазни колекторни двигатели с последователно възбуждане и репулсионни колекторни двигатели.

Работата на еднофазните колекторни двигатели е по принцип подобна на работата на постояннотоковите двигатели. И наистина на един постояннотоков двигател може да се приложи променливо напрежение - фиг.27.1.



Фиг.27.1.

Посоката на променливия ток в котвата и възбудителната намотка ще се изменя едновременно. При това положение въртящият момент се получава неравномерен, пулсиращ, но еднопосочен и котвата ще се върти в определена посока. Следователно двигателят за постоянен ток може да работи в променливотокова мрежа, само че въртящият момент тогава ще бъде малък, магнитопроводът ще прегрява, факторът на мощността $\cos \varphi$ ще бъде много нисък и най-важното - комутацията ще бъде много утежнена и придружена със силно искрене.

27.1.1. Индуктиране на е.д.н. в котвената намотка

Еднофазните колекторни двигатели имат котвена намотка, както при машините за постоянен ток. При въртенето на котвата в пулсиращия магнитен поток проводниците ѝ пресичат магнитните силови линии и в тях се индуктира е.д.н. Това е.д.н. не е постоянно, както при машините за постоянен ток, защото магнитният поток е променлив. От пулсиращото магнитно поле се индуктират във въртящата се котва две е.д.н. – е.д.н. на въртене и е.д.н. на трансформация (трансформаторно е.д.н.). Е.д.н. на въртене се индуктира от магнитния поток на полюсите $\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, както в постояннотокова машина. Това е.д.н., което се получава на четките, ще бъде променливо и ще пулсира едновременно с магнитния поток с честота f . Моментната стойност на е.д.н. на въртене за цялата котвена намотка, което се получава на четките, поставени в геометричната неутрална линия (г.н.л) е:

$$e_{ep} = \frac{pN}{a} n \Phi_m \sin \omega t . \quad (27.1)$$

Съответно ефективната стойност на това е.д.н. е:

$$E_{ep} = \frac{pN}{a} \frac{\Phi_m n}{\sqrt{2}} , \quad (27.2)$$

Е.д.н. на трансформация в котвената намотка се индуктира по подобен начин на трансформаторите – от пулсиращото магнитно поле. То съществува и при неподвижна котва. Когато четките са в г.н.л., е.д.н. на трансформация е нула. Тогава оста на потока $\Phi(t)$ и оста на котвената намотка са перпендикулярни. Трансформаторното е.д.н. е максимално, когато четките са разположени на ъгъл $\frac{\pi}{2}$ от г.н.л. Ефективната стойност на трансформаторното е.д.н се определя по зависимостта

$$E_{mp} = \sqrt{2} \pi f w k_w \Phi_m \approx 4,44 f w k_w \Phi_m . \quad (27.3)$$

Когато четките са изместени на ъгъл β от г.н.л. магнитният поток се разлага на две съставки $\Phi_d(t) = \Phi(t) \cos \beta$ и $\Phi_q(t) = \Phi(t) \sin \beta$. Потокът $\Phi_d(t)$ ще индуктира е.д.н. на въртене e_{ep} , магнитният поток $\Phi_q(t)$ индуктира е.д.н. на трансформация e_{mp} . Двете е.д.н. на четките ще пулсират с еднаква честота f , но дефазирани във времето на $\frac{\pi}{2}$. Те ще образуват резултатното е.д.н. $E_{рез}$ на котвената намотка, индуктирано от потока $\Phi(t)$.

27.1.2. Електромагнитен въртящ момент

Електромагнитният въртящ момент се създава от взаимодействието на магнитния поток $\Phi(t)$ и тока в котвата $i_a(t)$. Двете величини са променливи във времето. Моментът се определя по същата формула както при машините за постоянен ток, като в зависимостта участват моментните стойности на магнитния поток $\Phi(t)$ и тока на котвата $i_a(t)$

$$M(t) = c_M \Phi(t) i_a(t). \quad (27.4)$$

Създаденият въртящ момент има пулсиращ характер, но под влияние на механичната инерция се установява средна стойност на момента.

27.1.3. Комутация

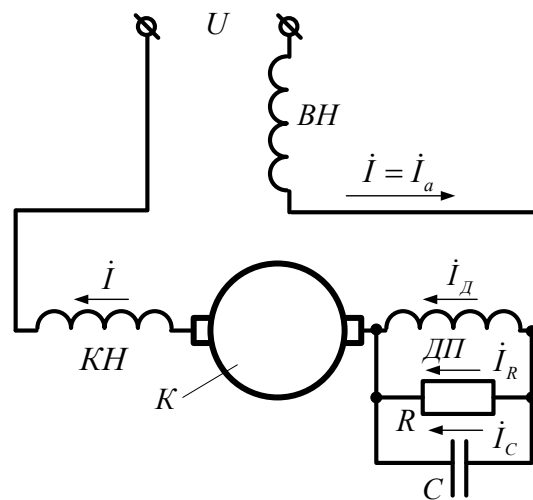
В променливотоковите еднофазни колекторни машини комутацията има по-сложен характер отколкото в машините за постоянен ток, което се дължи на променливия магнитен поток и на променливия котвен ток. При комутация в дадена секция токът се изменя от една моментна стойност в единия паралелен клон до друга моментна стойност в другия паралелен клон. В комутиращите секции на котвената намотка се индуктират два вида е.д.н. – реактивно е.д.н. и трансформаторно е.д.н.

Реактивното е.д.н. e_{rk} се индуктира вследствие на промяната на тока в комутиращите секции, равно на е.д.н. на самоиндукция и е.д.н. на взаимна индукция, както в машините за постоянен ток. Разликата се състои в това, че e_{rk} има различна стойност за отделните комутиращи секции.

Трансформаторното е.д.н. e_{mk} се индуктира от променливия магнитен поток на полюсите, за който комутиращата секция е една секция, съединена накъсо. Оста на потока на полюсите и оста на комутиращата секция съвпадат.

27.2. Еднофазни колекторни двигатели с последователно възбуждане

По своето устройство еднофазните колекторни двигатели с последователно възбуждане са близки до машините за постоянен ток. Имат същата конструкция на котвата. Статорът се изработва от листова електротехническа стомана поради променливия магнитен поток, който преминава през полюсите. В статорния пакет има главни и допълнителни полюси. Върху главните полюси е разположена възбудителната намотка ВН. На крайниците на главните полюси има канали, в които е разположена компенсационна намотка КН. Върху допълнителните полюси е разположена намотката на допълнителните полюси ДП (фиг.27.2).



Фиг.27.2.

Възбудителната намотка, компенсационната намотка и намотката на допълнителните полюси се свързват последователно на намотката на котвата. При определена честота на въртене за пълното ѝ компенсиране е необходимо токът през допълнителните полюси I_o да бъде дефазизиран спрямо тока I_a . За целта паралелно на допълнителните полюси се включват резистор R и кондензатор C . При еднофазни колекторни двигатели с последователно възбуждане с малка мощност няма компенсационна намотка и допълнителни полюси. Когато четките са в г.н.л. в котвената намотка се индуцират е.д.н. на въртене E_{ep} от потока на полюсите $\Phi(t)$, е.д.н. на самоиндукция E_{aq} индуцирано от напречния магнитен поток $\Phi_{aq}(t)$. Във възбудителната намотка от потока $\Phi(t)$ се индуцира е.д.н. на самоиндукция E_s . Уравнението на напрежението \dot{U} на еднофазния колекторен двигател има вида:

$$\dot{U} = -\dot{E}_{ep} - \dot{E}_s - \dot{E}_{aq} + R\dot{I} + j(x_{\sigma a} + x_{\sigma n})\dot{I} = -\dot{E}_{ep} - \dot{E}_s + R\dot{I} + jX\dot{I}, \quad (27.5)$$

където:

$R = r_a + r_e + r_{\partial n}$ - общо активно съпротивление в намотките;

r_a - активно съпротивление на котвата, вкл. на компенсационната намотка;

r_e - активно съпротивление на възбудителната намотка;

$r_{\partial n}$ - активно съпротивление на намотката на допълнителните полюси;

$x_{\sigma a}$ - индуктивно съпротивление на разсейване на котвената намотка;

$x_{\partial n}$ - индуктивно съпротивление на намотката на допълнителните полюси.

Може да се отчете, че

$$\dot{E}_{aq} = -jx_{aq}\dot{I}, \quad (27.6)$$

където:

x_{aq} - индуктивно съпротивление на котвената намотка от напречния поток.

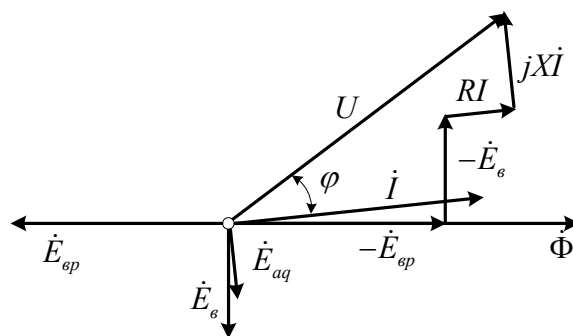
При заместване на (27.6) в (27.5) след рационализация се получава:

$$\dot{U} = -\dot{E}_{ep} - \dot{E}_e + R\dot{I} + jX\dot{I}, \quad (27.7)$$

където:

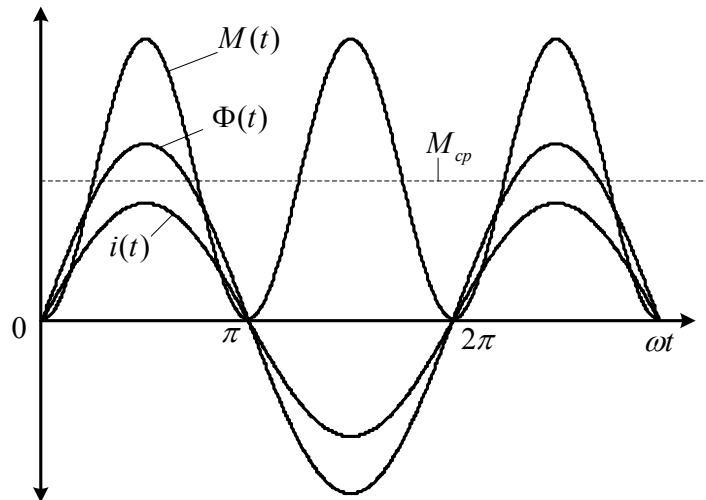
$$X = x_{aq} + x_{\sigma a} + x_{\partial n}.$$

На фиг.27.3 е показана векторната диаграма съответстваща на уравнение (27.7)



Фиг.27.3.

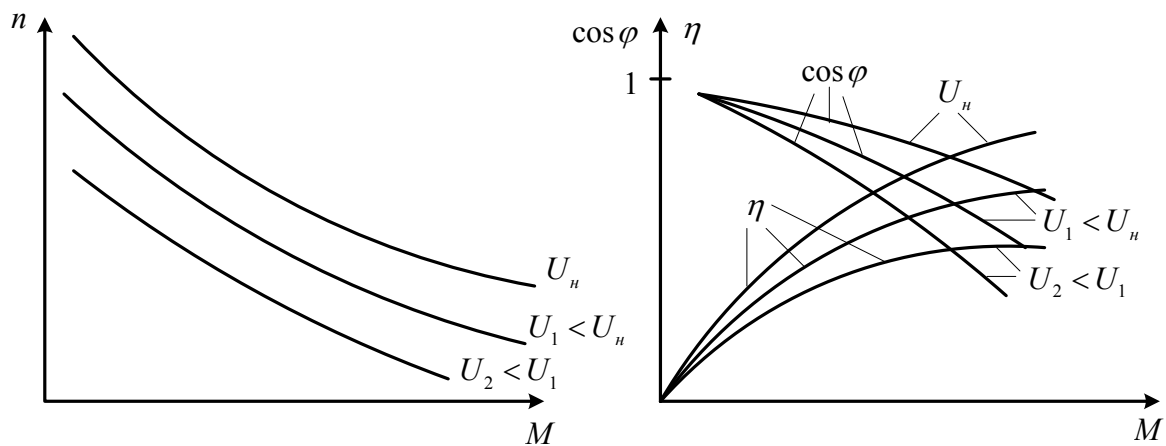
Въртящият момент се образува от взаимодействието на магнитния поток и котвения ток, за които се приема, че са във фаза. Полученият момент е пулсиращ (фиг.27.4).



Фиг.27.4.

Ако възбудителната намотка се включи в паралел, между котвения ток и магнитния поток ще има фазова разлика, при което образуваният въртящ момент ще намалее значително. Поради тази причина двигатели с паралелно възбуждане не се произвеждат.

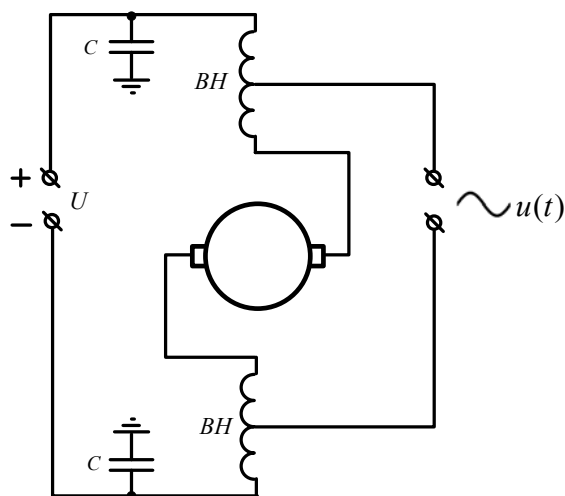
Механичната характеристика на двигателя с последователно възбуждане е мека. На фиг.27.5а се показани механичните характеристики за различни стойности на захранващото напрежение. На фиг.27.5б са показани съответните работни характеристики.



Фиг.27.5.

Еднофазните колекторни двигатели с последователно възбуждане намират широко приложение в промишлеността и бита, където се изискват големи честоти на въртене ($n = 3000 \div 30000 \text{ min}^{-1}$). Това са ръчни инструменти, шевни машини, прахосмукачки и др. Колекторните двигатели с последователно възбуждане понякога се изработват за работа в променливотокова и за постояннотокова мрежа. Тези двигатели се

наричат универсални колекторни двигатели. Тяхната схема е показана на фиг.27.6.



Фиг.27.6.

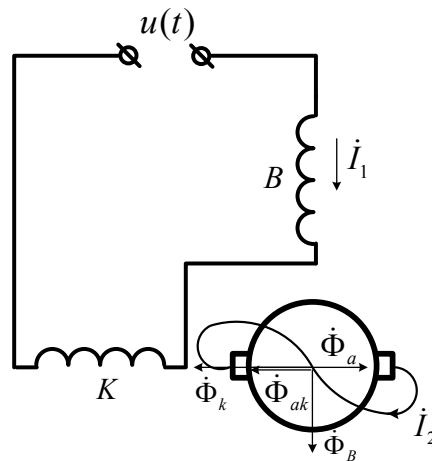
Възбудителната намотка е секционирана. При променлив ток се изключва част от възбудителната намотка. Това се прави с цел при еднакъв товарен момент да се получат приблизително еднакви честоти на въртене при захранване от променливотокова или постояннотокова мрежа с еднакви по големина напрежения.

27.3. Репулсионни двигатели

Репулсионни двигатели се наричат еднофазни колекторни двигатели, в които котвената намотка (поставена в ротора) няма електрическа връзка с първичната статорна намотка, която се захранва от променливотоковата мрежа. Между двете намотки съществува електромагнитна връзка. Четките на колектора са свързани накъсо.

27.3.1. Репулсионен двигател с две статорни намотки

Репулсионният двигател бива с една или две статорни намотки. На фиг.27.7 е дадена схемата на репулсионен двигател с две статорни намотки, чиито намотки са разположени на ъгъл $\frac{\pi}{2}$ (двигател на Аткинсън).



Фиг.27.7.

При включване към захранващата мрежа през статорните намотки протича ток I_1 . Той възбужда потока Φ_K на намотката К и потока Φ_B на намотката В. При неподвижен ротор индуктираното е.д.н. от потока Φ_B е нула, защото потокът е перпендикулярен на оста на четките.

Потокут Φ_K съвпада с оста на четките и затова индуктира в роторната намотка трансформаторно е.д.н., което не зависи от скоростта на въртене. Под действието на това е.д.н. в роторната намотка протича ток I_2 , който възбужда потока на реакцията на котвата Φ_a . Двама потока Φ_K и Φ_a действат в посока по оста на четките и си взаимодействат, като образуват резултантен магнитен поток с комплексна стойност:

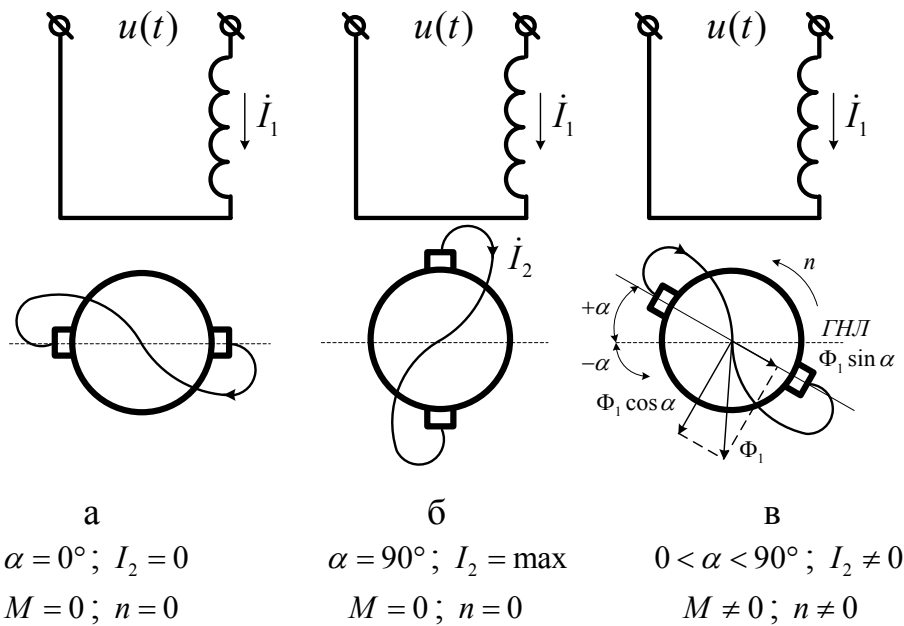
$$\dot{\Phi}_{aK} = \dot{\Phi}_a + \dot{\Phi}_K. \quad (27.8)$$

Протичащият ток I_2 взаимодейства с потока Φ_B и се образува въртящ момент. След завъртането на ротора и потокът Φ_B започва да индуктира е.д.н. вследствие на въртенето на ротора.

Регулирането на честотата на въртенето се извършва посредством изменение на захранващото напрежение. Обръщането на посоката на въртене се осъществява чрез превключване на една от статорните намотки. За разлика от еднофазните колекторни двигатели с последователно възбуждане, които имат пулсиращо магнитно поле, при репулсионните двигатели с две намотки в статора магнитното поле е елиптично. При определена честота на въртене магнитното поле става кръгово. Тогава условията за комутация са най-добри.

27.3.2. Репулсионен двигател с една статорна намотка

Намотките В и К могат да се представят с една обща намотка и един комплект четки (двигател на Томсон), както е показано на фиг.27.8.



Фиг.27.8.

Оста на четките на фиг.27.8а съвпада с геометричната неутрална линия и е перпендикулярна на оста на възбудителната статорна намотка, ъгъл $\alpha = 0^\circ$. В неподвижния ротор не се индуктира е.д.н. и токът $I_2 = 0$. Въртящ момент не се създава. Това е положение на празен ход.

На следващата фиг.27.8б ъгъл $\alpha = 90^\circ$, в неподвижната роторна намотка се индуктира максимално трансформаторно напрежение и протича максимален ток I_2 . Въртящ момент обаче не се създава, понеже двата потока действуват в едно направление. Това е положение на късо съединение.

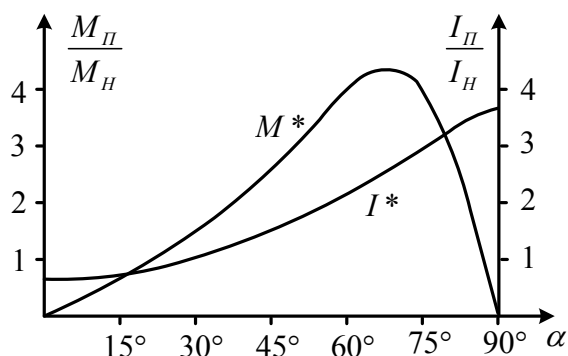
При ъгъл $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ (фиг.27.8в) статорното магнитодвижещо напрежение F_1 възбужда магнитен поток Φ_1 . Този поток се разлага на две съставки:

$\Phi_1 \sin \alpha$ действащ по оста на четките, който индуктира трансформаторно е.д.н. и прокарва тока I_2 . Другата съставка на потока е пропорционална на косинуса на ъгъла на завъртане на четките - $\Phi_1 \cos \alpha$. Тази съставка създава въртящия момент и индуктира в котвата е.д.н. на въртене. С промяната на ъгъла на завъртане на четките се променя големината на I_2 и на въртящия момент. По този начин се променя ъгловата скорост на двигателя. Обръщането на посоката на въртене се постига чрез различното завъртане на четките спрямо г.н.л. ($\alpha > 0$ или $\alpha < 0$).

Въртящият момент при ненаситена магнитна верига може да се изрази чрез формулата:

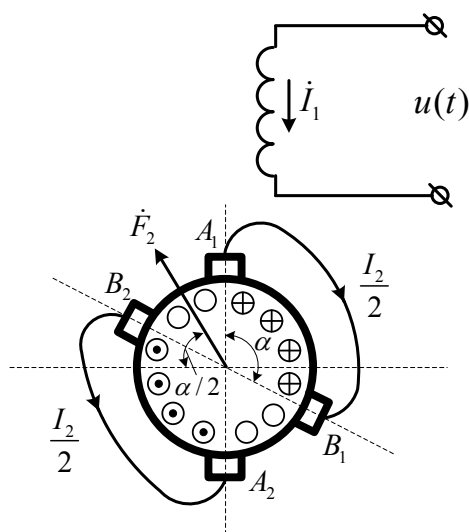
$$M = kI_1^2 \sin 2\alpha . \quad (27.9)$$

На фиг.27.9 са показани зависимостите на относителния пусков ток $\frac{I_{II}}{I_H}$ и относителния пусков момент $\frac{M_{II}}{M_H}$ от ъгъла на завъртане на четките α .



Фиг.27.9.

Репулсионните двигатели с един комплект четки имат недостатък, че въртящият момент M силно зависи от ъгъл α . При двигателите с два комплекта четки (двигател на Дери) този недостатък се избягва. Схемата на двигател на Дери е показана на фиг.27.10.



Фиг.27.10.

Четките A_1 и A_2 , разположени по оста на възбудителната намотка, са неподвижни, докато четките B_1 и B_2 , разположени на една траверса, са подвижни. Когато $\alpha = 0^\circ$, се реализира положение на празен ход. При $\alpha = 180^\circ$ е положение на късо съединение. Това включване позволява по-малко изменение на въртящия момент и по-плавно изменение на ъгловата скорост. Освен това при този тип двигатели в сравнение с двигателя с един комплект четки комутацията е подобрена.

Въпрос 28

Трифазни колекторни двигатели. Двигател „Шраге-Рихтер” - устройство, принцип на действие, характеристики

28.1. Трифазни колекторни двигатели

По своя принцип на действие трифазните колекторни двигатели са сходни с асинхронните. В тяхната вторична намотка, в която се индуцира е.д.н. sE_2 от въртящото се магнитно поле, се въвежда през четките и колектора допълнително е.д.н. E_k , чрез което става промяна на ъгловата скорост и фактора на мощността на двигателя. Това е.д.н. независимо от честотата на въртене трябва да има честота $f_2 = sf_1$, за да може да се сумира с $E_{2s} = sE_2$. Това се постига чрез колектора, който в случая е механичен честотопреобразувател.

28.1.1. Регулиране на скоростта на въртене чрез въвеждане на допълнително е.д.н.

Разглежда се момента когато асинхронният двигател с навит ротор работи с определена стойност на роторното съпротивление със съпротивителна характеристика с константен съпротивителен момент. При увеличение на роторното съпротивление настъпва преходен процес, като първоначално с увеличаване на съпротивлението се намалява роторният ток I_2 и с това въртящият момент M става по-малък от товарния момент. Двигателят се забавя и съответно хлъзгането се увеличава. При това роторното е.д.н. sE_2 нараства, което води до увеличаване на роторния ток I_2 и съответния момент M до първоначалните им стойности. В случая на изводите на регулиращото съпротивление се получава пад на напрежение $I_2 R_o$, което има честотата на роторното е.д.н. Този пад на напрежение може да се замести с е.д.н. E_o , което има същата честота като роторното е.д.н. Това е.д.н. също влияе на тока, момента и хлъзгането на двигателя. Само че докато в съпротивлението се получават загуби, то при въвеждане на допълнително е.д.н. в роторната верига, скоростта се изменя без тези загуби. Въведеното е.д.н. може да бъде във фаза или в противофаза с sE_2 . При анализа на въздействието на E_o се приема, че $R_2^2 \gg (sx_2)^2$ и може да се приеме, че $I_2 \approx \frac{sE_2}{R_2}$, следователно е във фаза с sE_2 .

28.1.2. Въвеждане на противопосочно е.д.н.

В разглеждания случай въведеното допълнително е.д.н. има винаги честотата на sE_2 , но е в противофаза. При въвеждането на E_0 общото е.д.н. намалява до стойност $sE_2 - E_0$, като първоначално предизвиква намаление на тока I_2 и на въртящия момент, предизвикващо намаление на скоростта и съответно увеличаване на хлъзгането до стойност s' , при което може да се запише:

$$s'E_2 - E_0 = sE_2. \quad (28.1)$$

При това положение през вторичната намотка пак протича първоначалният ток I_2 и двигателят работи с необходимия въртящ момент на новополучената скорост. Вторичният ток след и преди въвеждането на E_0 е

$$I_2 = \frac{s'E_2 - E_0}{R_2} = \frac{sE_2}{R_2}. \quad (28.2)$$

От уравнение (28.1) следва, че

$$s' = s + \frac{E_0}{E_2}. \quad (28.3)$$

Това уравнение доказва, че при въвеждане на е.д.н., което е в противофаза, че увеличава хлъзгането, следователно скоростта намалява.

28.1.3. Въвеждане на съпосочно е.д.н.

Въведеното е.д.н. има същата честота, но е във фаза с sE_2 . В момента на въвеждането на E_0 , общото е.д.н. нараства до стойност $sE_2 + E_0$. Това предизвиква нарастване на тока I_2 и на въртящия момент, скоростта нараства и съответно хлъзгането намалява до стойност s'' . В установения режим при $s''E_2$, токът I_2 и въртящият момент са възстановили първоначалните си стойности при новополучената скорост на въртене, при което:

$$s''E_2 + E_0 = sE_2, \quad (28.4)$$

и съответно за I_2

$$I_2 = \frac{s''E_2 + E_0}{R_2} = \frac{sE_2}{R_2}. \quad (28.5)$$

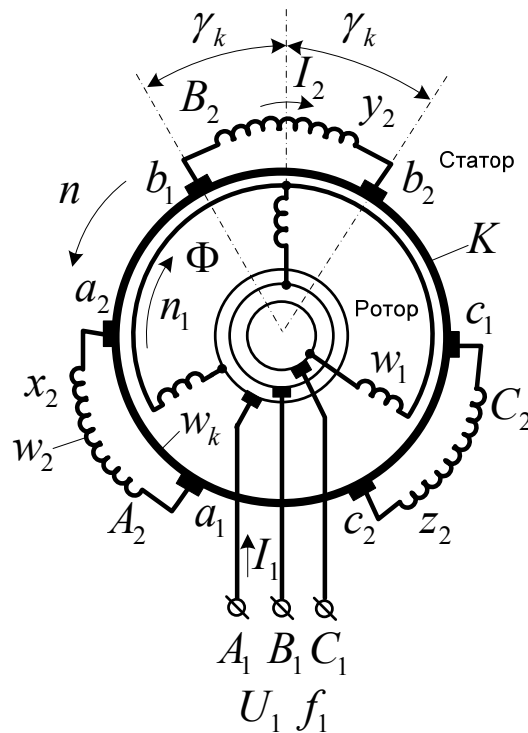
От тези уравнения следва, че

$$s'' = s - \frac{E_0}{E_2}. \quad (28.6)$$

Това уравнение доказва, че при въвеждане на съпосочно е.д.н. в ротора хлъзгането намалява т.е. скоростта нараства. Очевидно е, че когато се подаде допълнително е.д.н., при което $\frac{E_0}{E_2} > s$, новото хлъзгане става отрицателно $s'' < 0$. Следователно, двигателят може да работи с надсинхронна скорост.

28.2. Двигател „Шраге-Рихтер” - устройство, принцип на действие, характеристики

Този двигател е разработен през 1910 г. от Х. Шраге и Р. Рихтер независимо един от друг. По своята конструкция представлява обрнат асинхронен двигател. Принципната схема е показана на фиг.28.1.



Фиг.28.1.

В ротора се полагат две намотки:

- първична трифазна намотка - w_1 , свързана в звезда или триъгълник, изводите на която се присъединяват към контактните пръстени и чрез четките към електрическата мрежа с напрежение U_1 и честота f_1 .

Протичащите фазни токове възбуждат въртящо се магнитно поле, което се върти спрямо ротора с ъглова скорост $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$ и индуцира е.д.н. E_1 .

- допълнителна намотка - w_k , която е свързана с колектора, в нея се индуцира е.д.н. E_k

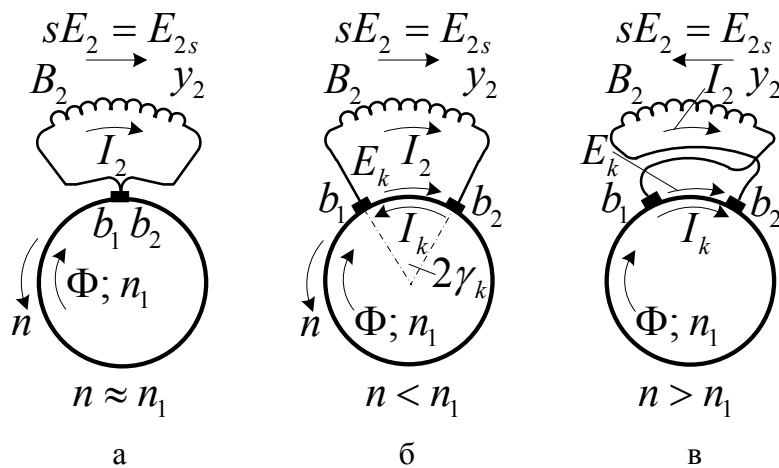
Двете намотки са поставени в общи канали в ротора и са в електромагнитна връзка. Индуктираните в тях е.д.н. E_1 и E_k имат честота f_1 .

Вторичната намотка w_2 се полага в каналите на статора и представлява симетрична m_2 фазна намотка ($m_2 = 3, 6, 12$). Изводите на вторичните фазни намотки се присъединяват към две системи четки, които контактуват с колектора.

Системата четки a_1, b_1, c_1 се свързва с началата на фазите на вторичната намотка. Системата четки a_2, b_2, c_2 се свързва с краищата на вторичната намотка. Четките от всяка система са пространствено разместени на ъгъл 120° . Те са монтирани на отделни траверси. Чрез специална механична система траверсите се завъртат и по този начин се променя ъгълът $2\gamma_k$ между всеки две четки, принадлежащи на една фаза. По този начин между всеки две четки могат да се включат различен брой навивки w_k от колекторната допълнителна намотка. Четките от двете системи могат да лежат на едни и същи колекторни пластини, т.е. да бъдат електрически свързани и ъгъл $\gamma_k = 0$, те могат да се раздалечат от това положение $\gamma_k > 0$, да се кръстосат $\gamma_k < 0$ и накрая могат да бъдат вдигнати от колектора.

Когато четките са вдигнати от колектора, вторичната и колекторната допълнителна намотка са електрически разделени и вторичният ток $I_2 = 0$. Момент не се създава и роторът е неподвижен. През първичната намотка протича намагнитващият ток I_M за възбуждането на магнитното поле.

На фиг.28.2 са показани за една фаза останалите три положения на четките $b_1 - b_2$.



Фиг.28.2.

На фиг.28.2а четките се допират. Вторичната намотка е свързана накъсо. В нея не се въвежда външно е.д.н. E_k . Това е един обрънат асинхронен двигател с фазов ротор, който работи с подсинхронна скорост на въртене $\omega < \omega_1$. Характерна особеност е, че магнитният поток Φ_1 , възбуден от първичната намотка, се върти в посока, обратна на посоката на въртене на ротора.

На фиг.28.2б четките са раздалечени на ъгъл γ_k от оста на симетрия на вторичната намотка. Вторичната и допълнителната намотки са електрически свързани. Във вторичната статорна намотка се въвежда допълнителното е.д.н. E_k , индуктирано в допълнителната колекторна намотка на ротора. Ако двете намотки са навити еднопосочно, е.д.н. индуктирани в тях - sE_2 и E_k , ще бъдат противоположни, в общия контур - статорна намотка, четки, колекторна намотка, те се изваждат. Следователно E_k е в противофаза. Това отговаря на режим на подсинхронна скорост. Големината на е.д.н. E_k зависи от навивките w_k на допълнителната колекторна намотка, които са включени между двете четки, принадлежащи на една фаза. Те се определят от ъгъла на разтвяряне на четките. При празен ход на двигателя $M_2 = 0$, респ. $I_2 = 0$. Това условие се реализира, когато резултантното е.д.н. във вторичната верига $E_{2\text{рез.}} = s_0 E_2 - E_k = 0$. При даден ъгъл γ_k , съответства скорост на въртене на празен ход n_0 . Ако при това положение двигателят се натовари с някакъв съпротивителен момент M_c , честотата на въртене ще се намали, а хлъзгането ще се увеличи, при което $sE_2 > E_k$. Тогава във вторичната верига протича токът I_2 и се създава електромагнитен въртящ момент M , който уравнисява приложения съпротивителен момент M_c . Това е натоварване при подсинхронна скорост.

При кръстосани четки (фиг.28.2в) двете е.д.н. са съпосочни и резултантното е.д.н. е $E_{2\text{рез.}} = sE_2 + E_k$. Това води до увеличаване на вторичния ток I_2 . При $M_c = \text{const}$ следва увеличаване на честотата на въртене. При достатъчно голяма стойност на въведеното е.д.н. E_k във вторичния контур, честотата на въртене на ротора надвишава синхронната и хлъзгането $s < 0$. За разлика обаче от асинхронната машина, тук машината продължава да работи като двигател при отрицателно хлъзгане. Това се дължи на обстоятелството, че токът I_2 не сменя посоката си и моментът продължава да е двигателен. При малко е.д.н. E_k е възможна работа с подсинхронна скорост.

Големината на E_k зависи от навивките w_k на допълнителната намотка, които са включени между двете четки, принадлежащи на една фаза. То се определя от ъгъла на разтваряне на четките:

$$E_k = \sqrt{2}\pi f_1 w_k k_{w_k} \Phi_m. \quad (28.7)$$

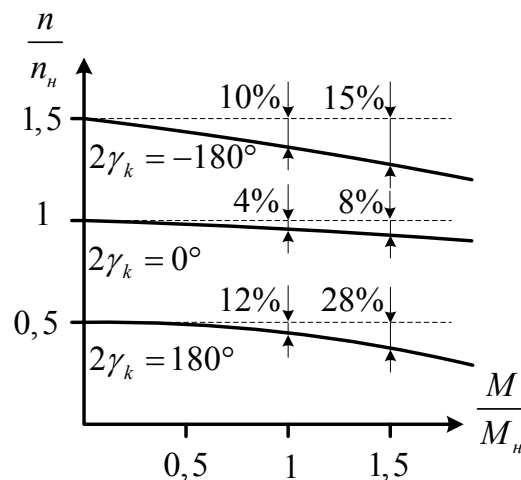
където:

Φ_m - резултатен магнитен поток на машината;

k_{w_k} - коефициентът на намотката.

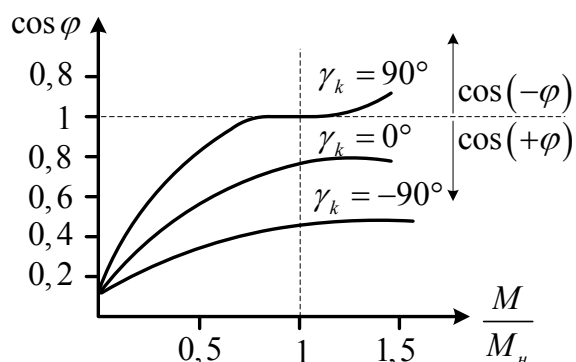
Механичните характеристики на двигателя при даден ъгъл на разтваряне на четките са твърди, понеже при промяна на натоварването $\Phi \approx \text{const}$. Тези характеристики са показани на фиг.28.3. Максималният момент на тези двигатели е много голям. Например при диапазон на регулиране 3:1 при $\gamma_k = -90^\circ$, $\frac{M_m}{M_n} = 5,5$ при $\gamma_k = 0^\circ$, $\frac{M_m}{M_n} = 2,8$, при $\gamma_k = 90^\circ$,

$$\frac{M_m}{M_n} = 2.$$



Фиг.28.3.

На фиг.28.4 са показани характеристиките $\cos \varphi = f\left(\frac{M}{M_n}\right)$ при три стойности на ъгъл γ_k : 90° ; 0° ; -90° .



Фиг.28.4.

Предимствата на този тип двигатели се състои в плавното регулиране на скоростта. Като недостатъци могат да се изтъкнат сложната конструкция, високата цена и др. В съвременни условия тези двигатели намират все по-малко приложение, изместени от системите честотен полупроводников преобразувател - асинхронен или синхронен електродвигател.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ангелов, А., Д. Димитров. Електрически машини – I част. София, “Техника”, 1976.
2. Ангелов А., Д. Димитров. Електрически машини – II част, София, “Техника”, 1976.
3. Илиев, Т. Електрически машини. Габрово, 2012.
4. Ненов, Н., Г. Клисаров. Електрически машини. София, “Техника”, 1970.
5. Вольдек, А. Электрические машины. Ленинград, Энергия, 1978.

СЪДЪРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Въпрос 1. Принцип на действие на постояннотоковите машини (ПТМ). Устройство на ПТМ. Основни елементи..... | 3 |
| Въпрос 2. Магнитна верига на ПТМ..... | 11 |
| Въпрос 3. Намотки на ПТМ. Видове. Е.д.н. на ПТМ..... | 16 |
| Въпрос 4. Реакция на котвата на ПТМ..... | 21 |
| Въпрос 5. Комутация..... | 24 |
| Въпрос 6. Средства за подобряване на комутацията..... | 26 |
| Въпрос 7. Постояннотокови генератори (ПТГ), видове. ПТГ с независимо възбуждане. Характеристики..... | 28 |
| Въпрос 8. ПТГ с паралелно, последователно и смесено възбуждане..... | 34 |
| Въпрос 9. Основно уравнение на напрежението. Енергетична диаграма. Електромагнитен момент на ПТГ..... | 42 |
| Въпрос 10. Постояннотоков двигател (ПТД). Видове. Енергетична диаграма. ПТД с независимо и шунтово възбуждане, характеристики. Пускане в ход.на ПТД..... | 44 |
| Въпрос 11. ПТД с последователно и смесено възбуждане. Характеристики. Пускане в ход..... | 51 |
| Въпрос 12. Устройство и принцип на действие на синхронните машини (СМ)..... | 55 |
| Въпрос 13. Взаимодействие между магнитните полета на индуктора и котвата, изразени чрез пространствени вектори..... | 58 |
| Въпрос 14. Магнитно поле и параметри на неявнополюсна и на явнополюсна машина..... | 63 |
| Въпрос 15. Уравнение на напрежението на синхронен генератор (СГ). Векторни диаграми. Характеристики..... | 68 |
| Въпрос 16. Паралелна работа на синхронните генератори..... | 78 |
| Въпрос 17. Ъглови характеристики на СМ. Статическо претоварване. Синхронизирана мощност и момент..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Въпрос 18. Превъзбуждане и недовъзбуждане на синхронна машина. V – криви..... | 86 |
| Въпрос 19. Синхронен двигател (СД). Мощност и момент. Работни характеристики..... | 90 |
| Въпрос 20. Начини на пускане на синхронен двигател. Синхронен компенсатор..... | 94 |
| Въпрос 21. Колебание и динамична устойчивост на синхронните машини..... | 98 |
| Въпрос 22. Синхронни машини с постоянни магнити. Реактивни синхронни двигатели..... | 100 |
| Въпрос 23. Стъпкови двигатели. Синхронни тахогенератори..... | 103 |
| Въпрос 24. Селсини. Завъртащи трансформатори. Безконтактни селсини..... | 108 |
| Въпрос 25. Изпълнителен двигател за постоянен ток. Тахогенератор за постоянен ток. Специални постояннотокови генератори..... | 113 |
| Въпрос 26. Специални постояннотокови машини с постоянни магнити. Високомоментни ПТМ..... | 118 |
| Въпрос 27. Еднофазни колекторни двигатели - индуктиране на е.д.н., въртящ момент, комутация. Репулсионни двигатели..... | 120 |
| Въпрос 28. Трифазни колекторни двигатели. Двигател „Шраге-Рихтер” - устройство, принцип на действие, характеристики..... | 130 |
| Литература..... | 137 |

гл. ас. д-р инж. Цветозар Петков – автор 2021

Рецензент: доц. д-р инж. Дешка Маркова

**ЛЕКЦИОНЕН КУРС
ПО ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ – II ЧАСТ**

Българска
Първо издание