

Електромеханични устройства

Г. Божилов Е.Соколов И.Ваклев

техника

Учебникът е написан в съответствие с учебната програма по дисциплината електро-механични устройства за студентите от всички специалности на ФА, ФЕТТ, ФКТТ и ФКСУ при Технически университет — София. Може да се използва и от студентите от сродни специалности в другите висши технически училища в страната.

Включени са основни въпроси от електро-енергетиката, електромеханичното преобразуване на енергията, електрическите апарати, трансформаторите и въртящите се електрически машини и микромашини.

От доц. Г. Божилов са написани гл. III, IV, VIII, XII, от доц. Е. Соколов — гл. I, II, VII, XI, от доц. И. Ваклев — гл. V, VI, IX и X.

1 | Общи въпроси на електроенергетиката

1.1 Производство на електрическа енергия

Електроенергетиката е основен отрасъл на народното стопанство. Развитието и усъвършенстването на енергийната система са свързани с комплексното решаване на редица технически и икономически проблеми. Към тях се отнасят оценката и планирането на *енергийните ресурси*. Това са основните природни източници на енергия — водата в реките и язовирите, различните органични горива (въглища, нефт, газ), ядрените горива (уран, торий) и т. н. Ограниченият потенциал на основните енергийни ресурси прави актуална задачата за усвояване на нетрадиционните източници на енергия (слънчева, геотермална, на вятъра, на морските вълни и др.).

Едновременно с проектирането и строителството на нови енергийни мощности се модернизират и разширяват електрическата мрежа. Повишава се ефективността и надеждността при производството и пренасянето на електрическата енергия до потребителите. Други важни задачи са рационалното използване на енергийните ресурси и намаляването на загубите при преобразуването и снабдяването с електрическа енергия и топлина. Съществена роля има икономията на електрическа енергия в промишлеността. Разходите на енергия могат да бъдат намалени чрез въвеждане на конструкции и технологични методи, при които за производството на изделия е необходимо изразходването на минимално количество електрическа енергия.

Наред с решаването на националните проблеми в областта на електроенергетиката голямо значение има международното сътрудничество. То се изразява в доставка на съоръжения и горива, обмен на електроенергия и научно-техническо сътрудничество. Примери в това отношение са обединените енергийни системи в Северна Америка, единната енергийна система на страните в Западна Европа и обединените енергийни системи (ОЕС) на страните от Източна Европа. Осъществяването на такава интеграция

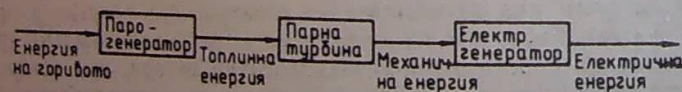
има някои съществени предимства. Например поради размятането на денонощните и месечните графични на натоварването се получава резерв, който може да се използва за покриване на дефицит на енергия в отделни страни.

Преобразуването на природните източници на енергия се извършва в *електрически централи*. Те представляват комплекс от съоръжения, обединени от общ технологичен процес. В зависимост от вида на използваната първична енергия електрическите централи са *термични (ТЕЦ)*, *водни (ВЕЦ)* и *атомни (АЕЦ)*.

Етапите на преобразуване на енергията в *термичните електроцентрали (ТЕЦ)* са показани на фиг. 1.1. При централите, работещи с твърдо гориво, въглищата се смила и полученят прах постъпва заедно с поток горещ въздух в пещта на парогенератора, където изгаря. В пещта са разположени вертикални тръбни снопове, в които чрез помпи се подава вода. Получената при горенето топлина загрява водата и почти напълно я изпарява. Чрез система от паропрегреватели парата се преграва до температура 520—560 °C и налягане 14—20 МПа.

В парната турбина потенциалната енергия на парата се превръща в механична енергия. Парните турбини са многостъпални, за да се получи максимален коефициент на полезно действие. Във всяко стъпало парният поток най-напред се ускорява в неподвижни направляващи дюзи, от които постъпва в работните лопатки на турбината. Валът на турбината е свързан директно с вала на синхронния генератор. В него механичната енергия се превръща в електрическа енергия на променлив ток. В редица наши термични електроцентрали работят синхронни турбогенератори с номинална мощност 210 MW, номинална честота на въртене 3000 min⁻¹ и номинално напрежение 15,75 kV.

След като излезе от парната турбина, парата се охлажда в кондензатора. През него преминава охлаждаща вода, която от своя страна чрез принудителна циркулация се охлажда в езера или охладителни кули. Кондензираната вода с помощта на помпа се връща в парогенератора за повторно изпарение.



Фиг. 1.1. Преобразуване на енергията в термична електроцентрала (ТЕЦ)

Параметрите на състоянието на термодинамичната система — абсолютната температура T , налягането p и специфичният обем v , са свързани с уравнението

(1.1)

$$pv = RT,$$

където R е газовата константа.

Количеството топлина q , което се внася или отнема в термодинамичната система, според втория закон на термодинамиката може да се определи чрез температурата T и ентропията s :

(1.2)

$$q = \int_{s_1}^{s_2} T ds.$$

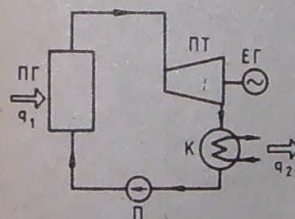
При затворен непрекъснат термодинамичен цикъл топлината се превръща в механична работа, ако термичният двигател (парната турбина) работи с два източника на топлина с различни температури. Поради несобратимостта на термомеханичното преобразуване на енергията този процес е съпроводен със загуба на енергия, чиято мярка е ентропията.¹

На фиг. 1.2 е показана принципната схема на паротурбинна инсталация. Процесите при термодинамичния цикъл могат да се обяснят чрез диаграмите $p(v)$ и $T(s)$ — фиг. 1.3.

Процес 1—2. В парогенератора ПГ се внася топлина в цикъла по *изобара* ($p = \text{const}$). Температурата на водата се повишава до температурата на кипене. Кипенето протича по *изотерма* ($T = \text{const}$), след което парата се преграва. Количеството топлина q_1 , което се предава на работното тяло при изгарянето на горивото, се определя по (1.2) чрез площта $a-1-2-b-a$ на диаграмата $T(s)$.

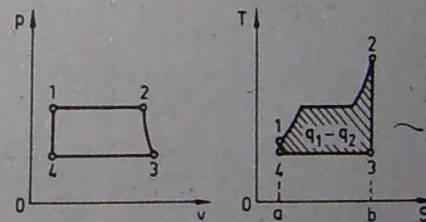
Процес 2—3. Това е *адиабатно* разширение на преграятата пара в парната турбина ПТ (при пренебрегване на загубите в турбината $s = \text{const}$).

Процес 3—4. Топлината от цикъла се отвежда чрез кондензатора К по *изобара* и *изотерма* до пълното втечняване на парата.



Фиг. 1.2. Принципна схема на паротурбинна инсталация

ПГ — парогенератор, ПТ — парна турбина, ЕГ — електрически генератор, К — кондензатор, П — помпа



Фиг. 1.3. Към обяснението на процесите при термодинамичния цикъл

¹ Ентропия — величина в термодинамиката, характеризираща топлинното състояние на системата и възможността за изменението му.

Количеството топлина q_2 , което според (1.2) се отделя в околната среда, се представя с площта $a-4-3-b-a$ на диаграмата $T(s)$.

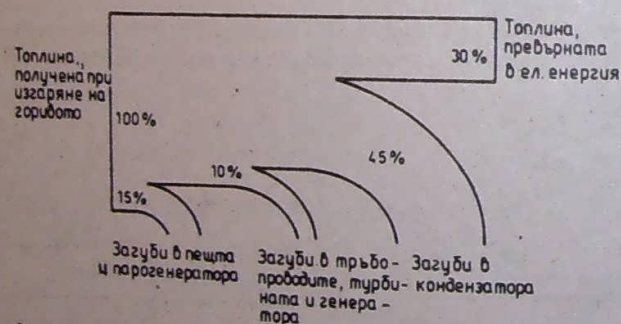
Процес 4-1. Това е адиабатно повишаване на налягането на водата в помпата П. Тъй като водата практически е несвиваема, съгъстяването в помпата е изохорно ($v = \text{const}$).

Термичният к. п. д. на цикъла е

$$(1.3) \quad \eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

Вижда се, че термичният к. п. д. е толкова по-висок, колкото е по-голяма разликата между параметрите на състоянието преди и след парната турбина, респ. между топлината, внесена в горещия източник (парогенератора), и топлината, отведена в студения източник (кондензатора). Термичният к. п. д. на съвременните паротурбинни инсталации достига до 45%. Освен чисто термодинамичната загуба q_2 съществуват и други загуби в останалите съоръжения: парогенератор, турбина, помпа, тръбопроводи и др. На фиг. 1.4 е показан топлинният баланс на кондензационна електроцентрала. Тя служи за производство само на електроенергия. В нашата енергетика са голяма мощност са кондензационните електроцентрали ТЕЦ „Варна“, ТЕЦ „Д. Дичев“, ТЕЦ „Марица-изток 2“, ТЕЦ „Бобов дол“.

За да се подобри енергийният баланс, се строят и топлофикационни електроцентрали край по-големите градове. Те са предназначени за производство на електри-



Фиг. 1.4. Енергиен баланс на кондензационна електроцентрала

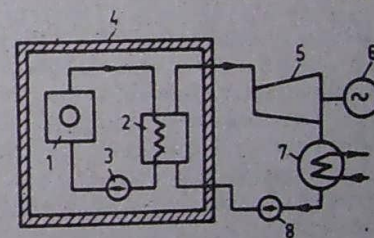
ческа енергия и топлина, която се използва за технологични нужди в промишлеността и за отопление в бита. У нас със средна мощност са топлофикационните централи ТЕЦ „София“, ТЕЦ „Трайчо Костов“, ТЕЦ „Пловдив“.

България е бедна на енергийни ресурси. От общите запаси на въглища 90% са лигнитни, а 9% — кафяви. Независимо от то-

ва у нас се използват успешно нискокалоричните твърди горива. Тъй като те не са достатъчни, внасят се въглища и нефт. С течни горива работят предимно топлофикационните и отоплителните централи.

За условията на нашата страна атомните електроцентрали (АЕЦ) са ефективен и перспективен електроенергиен източник. Принципната схема на АЕЦ с два контура е показана на фиг. 1.5. Първият контур включва ядрения реактор 1, парогенератора 2 и циркуляционната помпа 3. Той е защитен чрез биологична защита 4. В активната зона на ядрения реактор протича управляема ядрена верижна реакция, при която се отделя голямо количество топлина. Ядреното гориво е природен или слабо обогатен уран. В нашата енергетика работят съветски водородни енергийни реактори тип ВВЕР на бавни неутрони. Наричат ги така, защото водата служи за забавяне на неутроните и за топлоносител. Реакторите са снабдени със система за управление и защита. Тя е предназначена да регулира, поддържа и прекратява верижната реакция на деление на ядрата. В първия контур циркулира вода под налягане, чиито параметри на изхода от реактора са температура 320°С и налягане 16 МПа.

Парогенераторът е обединяващо звено на първи и втори контур. Чрез него се разделят топлоносителите в двата контура. Постъпващата в парогенератора вода на втория контур се изпарява. Парата задвижва турбината 5, която предава механична енергия на генератора 6. Останалите елементи на втория контур са кондензаторът 7 и помпата 8. Вторият контур по принцип не се отличава от паротурбинната инсталация на ТЕЦ. Същото важи и за термомеханичното преобразуване на енергията.



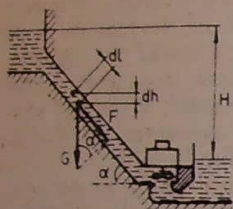
Фиг. 1.5. Принципна схема на АЕЦ с два контура

1 — ядрен реактор, 2 — парогенератор, 3 — помпа, 4 — биологична защита, 5 — турбина, 6 — генератор, 7 — кондензатор, 8 — помпа

В АЕЦ „Козлодуй“ работи най-големият турбогенератор в нашата страна със следните данни: номинална мощност 1000 MW; номинална честота на въртене 1500 min⁻¹; номинално напрежение 24 kV. След изграждането на шестия енергиен блок общата мощност на генераторите в централата ще достигне 3760 MW.

Многогодишният опит, натрупан при проектирането и експлоатацията на АЕЦ в целия свят, дава възможност да се повишава единичната мощност на реакторите и ефективността на използването им, да се осигурява висока надеждност и безопасност на съоръженията при експлоатация. Прогнозите показват трайна

тенденция за развитието на ядрената енергетика на базата на делението на тежки ядра. Обаче несъмнено в бъдеще още по-голямо ще бъде значението на овладяването и практическото използване на енергията, получена при управляем термоядрен синтез на леки ядра. Изследванията на системите за термоядрен синтез на изотопите на водорода — деутерий и тритий — се намират в напреднал стадий. За загряване на деутериево-тритиевата плазма се използва електрически ток, а високотемпературната плазма (с температура 100 млн. градуса) се удържа в стабилно състояние чрез мощно магнитно поле. Получаването на енергия чрез термоядрен синтез има редица съществени предимства — практически неизчерпаеми запаси на евтино гориво, отсъствие на токсичност и радиоактивност в крайните продукти на синтеза, изключване на възможностите за аварии с тежки последствия. Заредените частици, от които се състои високотемпературната плазма, могат да се преобразуват непосредствено в електрическа енергия чрез магнитно-хидродинамични генератори.



Фиг. 1.6. Принципова схема на ВЕЦ

Водно-електрическите централи (ВЕЦ) произвеждат електрическа енергия с по-ниска себестойност в сравнение с останалите видове централи, без да замърсяват околната среда. Принципната схема на ВЕЦ е показана на фиг. 1.6. Водата от горното езеро (водохранилището) по напорния тръбопровод се подвежда към водната турбина и след нея се изпуска в долното езеро. В турбината енергията на водата се превръща в механична енергия, която се преобразува в електрическа в хидрогенератора. Работата A , която се извършва при преместване на водата dl , се определя чрез силата F , действаща на сечението на тръбопровода. Тази сила може да се изрази чрез силата на тежестта G на елементарен обем Δv . Тогава работата е

$$(1.4) \quad dA = Fdl = G \sin \alpha dl = Gdh.$$

От своя страна силата G се определя чрез плътността на водата ρ и земното ускорение g :

$$(1.5) \quad G = \rho g \Delta v.$$

Ако се приеме, че напорът H остава постоянен, то

$$(1.6) \quad A = \int_0^H G dh = \rho g \Delta v H.$$

Хидравличната мощност P се получава, като се разделят двете страни на горното уравнение на интервала от време Δt . При постоянен дебит

$$(1.7) \quad Q = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

се получава

$$(1.8) \quad P = \rho g QH.$$

Горният израз дава теоретичната хидравлична мощност на централата при пренебрегване на загубите на налягане в тръбопровода. Вижда се, че хидравличната мощност не зависи от ъгъла на наклона α , от сечението на тръбопровода и скоростта на водното сечение в него. Затова при зададени стойности на напора H и дебита Q трябва да се определят оптимални размери на хидравличната инсталация (например диаметър на тръбопровода) и да се избере подходящ тип на водната турбина.

Необходимо е да се има предвид, че хидравличната мощност на ВЕЦ не е постоянна. Дебитът се променя в зависимост от сезона, хидрометеорологичните условия, използването на вода за напояване и др.

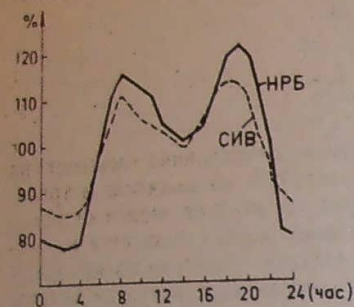
Освен по описаната схема ВЕЦ се строят и по течението на големи пълноводни реки. В този случай напорът се създава чрез преградна стена и е сравнително малък, а дебитът — голям. Когато реката е плавателна, за преминаване на корабите се изграждат шлюзове. Разнообразието на природните условия, при които се строят ВЕЦ, определя голямо разнообразие в конструктивното изпълнение на водните турбини. Мощността им се изменя от няколко мегавата до 850 MW, а честотата на въртене — от $16\frac{2}{3}$ до 1000 min^{-1} . Бързоходни турбини се използват при голям напор, а бавноходни — при голям дебит и по-малък напор. У нас най-големите водни турбини са с мощност 136 MW при 333 min^{-1} . Общата мощност на каскадата Белмекен—Сестримо е 770 MW.

Честотата на въртене на турбината не се избира произволно. Тя съответствува на синхронната честота на въртене на електрическия генератор при зададена честота на мрежата и брой на полюсите (вж. гл. VI).

В електроцентралите работят повече от един (от два до двадесет) агрегати турбина—генератор.

Генераторите на всички електроцентрали в дадена страна са включени паралелно към обща електрическа мрежа и отдават енергия към нея. Към същата мрежа са свързани и консуматорите на електроенергия. Съвкупността от съоръжения, предназначени за производство, преобразуване, пренасяне, разпределение и потребление на електрическата енергия, образува електроенергийната система на страната.

Производството и потреблението на електрическа енергия са взаимно свързани процеси. Тъй като променливотоковата електрическа енергия не може да се акумулира, консумираната енергия в системата трябва по всяко време да бъде равна на произведената. По различни причини консумацията е неравномерна и зависи от сезона, от деня през седмицата, от часа през денонощието. Тази неравномерност се изразява с *товаров график*, който представлява изменението на сумарната мощност на потребителите във времето.



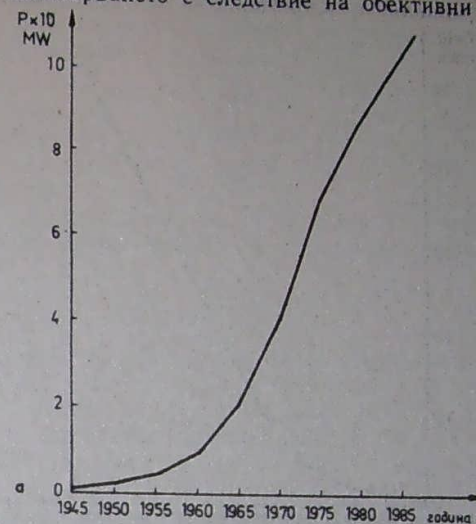
Фиг. 1.7 Денонощен график на натоварването на енергийната система в % от средното натоварване

Най-голяма неравномерност се получава в работен ден през зимата, защото тогава се включват и изключват най-много потребители за отопление и осветление. Денонощният график (на натоварването на нашата енергийна система (плътна линия) и на обединените енергийни системи на страните от Източна Европа (прекъсната линия), в работен ден през зимата е показан на фиг. 1.7. Изменението на натоварването е дадено в % от средното натоварване за денонощието. Първият максимум в графика е причинен от започването на работния ден в учрежденията и повечето от промишлените предприятия. Вторият максимум се дължи на включването на осветлението, електрическите нагревателни уреди, електродомашните уреди, телевизорите и др. Консумацията на електрическа енергия намалява значително през нощта. Общата енергия, която се произвежда в енергийната система, трябва да се изменя по същия начин. Това е възможно, тъй като общата мощност на генераторите във всички централи е по-голяма от сумарната мощност на всички потребители.

Електрическите централи са базови и върхови. В базовите централи (всички АЕЦ и повечето ТЕЦ) генераторите работят денонощно с номиналната си мощност. За върхови централи се използват предимно ВЕЦ и някои ТЕЦ с по-малка мощност. Те работят с пълната си мощност по време на върховете, натоварвания и се изключват или работят с намалена мощност в периода на излишък на електрическа енергия. Предимство на агрегатите във ВЕЦ е, че се пускат бързо. В маневрени режими ТЕЦ работят по-бавно и с по-големи загуби, но използването им с повишена ефективност е възможно чрез регулиране на отношението между електрическата и топлинната енергия при топлофикационните централи.

В народното стопанство се вземат мерки за изравняване на

графика на натоварването, например повишаване сменността на работа, по-ниска тарифа на нощната енергия, топлоакумулиращи електроотоплителни уреди и др. Независимо от това променливият характер на натоварването е следствие на обективни обстоятел-

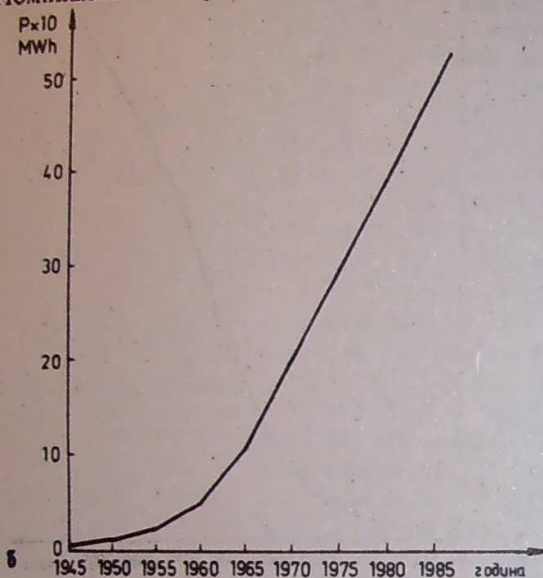


Фиг. 1.8 а. Ръст на общата инсталирана мощност

ства. Затова маневрирането в режима на електропроизводството е неизбежно. То се управлява от централен диспечерски пункт. Изключването на консуматори при дефицит на електроенергия се използва само като крайна мярка.

За регулиране на мощността на системата съществена е ролята на помпено-акумулиращите електрически централи (ПАВЕЦ). При тях съоръженията се проектират така, че да бъдат обратими. Една и съща хидравлична машина може да работи като турбина или помпа, а една и съща електрическа машина — като генератор или двигател. Режимът на агрегата се променя чрез промяна на посоката на въртене. По принцип схемата на ПАВЕЦ не се отличава от тази на фиг. 1.6. По време на върховото натоварване на системата ПАВЕЦ работи както ВЕЦ и отдава електрическа енергия към мрежата. През нощните часове ПАВЕЦ връща вода от долното водохранилище в горното, като се самозапасава с енергия за следващия цикъл. В този случай двигателите консумират електрическа енергия от системата, преобразуват я в механична и задвижват помпите. По такъв начин ПАВЕЦ създават благоприятни условия за работа на базовите централи с постоянно натоварване и за намаляване на неравномерността в денонощния график. У нас в

строеж е една от най-големите в Европа ПАВЕЦ — „Чаира“. Номиналната мощност на електрическите машини на всеки от четирите агрегата е 240 MVA като генератор или 216 MW като двигател. Номиналното напрежение е 19 kV, а номиналната чес-



Фиг. 1.8 б. Ръст на консумираната електроенергия в нашата страна

тата на въртене — 600 min^{-1} . Пускането на един агрегат трае 3–4 минути.

Нашата електроенергетика се развива интензивно. На фиг. 1.8 а е показан ръстът на общата инсталирана мощност, а на фиг. 1.8 б — ръстът на консумацията на електроенергия у нас. Общата инсталирана мощност (1987 г.) надхвърли 11 000 MW. Понастоящем около 90% от общата консумирана електроенергия е собствено производство, а останалата част се внася. Инсталираната мощност се разпределя по видове централи, както следва: ТЕЦ — 57%, АЕЦ — 35%, ВЕЦ — 8%. Към края на века у нас относителната част на АЕЦ ще бъде 47% от общата инсталирана мощност и 58% от произведената електроенергия.

1.2. Пренасяне, разпределение и потребление на електрическа енергия

Електроенергийната система обединява всички производители и потребители на електрическа енергия в страната. Концентрацията на електрическите товари (големи

градове и промишлени центрове) не съвпада с местоположението на повечето електрически централи. Това налага пренасяне на големи мощности на големи разстояния. Производството и пренасянето на електрическата енергия става с трифазен променлив ток. Пълната мощност, изразена чрез линейното напрежение U_L и линейния ток I_L , е

$$(1.9) \quad S = \sqrt{3} U_L I_L$$

Загубите на мощност в трифазен електропровод са

$$(1.10) \quad p = 3 R I_L^2$$

където R е съпротивлението на една фаза на електропровода. След като се изрази токът чрез мощността, се получава

$$(1.11) \quad p = \frac{S^2}{U_L^2} R$$

При определена дължина и сечение на проводниците ($R = \text{const}$) и зададена мощност ($S = \text{const}$), за да се намалят загубите в електропровода, е необходимо да се увеличи напрежението. Номиналните напрежения¹ за пренасяне на електрическа енергия са 110, 220, 400, 500 и 750 kV. Изборът на номинално напрежение зависи главно от мощността и дължината на електропровода. В близост до потребителите енергията се пренася по разпределителни електропроводи, които са по-къси и с по-малка мощност. Номиналните напрежения на разпределителните електропроводи са 6, 10, 20 и 110 kV. Номиналните напрежения на потребителите са 380 V (трифазно) и 220 V (еднофазно).

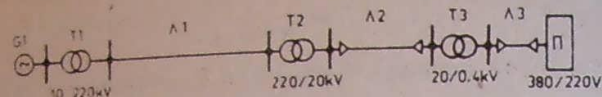
Различните напрежения, чрез които се пренася, разпределя и консумира електрическата енергия, изискват многостепенно преобразуване на напрежението на електропроводите между централите и потребителите. Това преобразуване на стойностите на напрежението и тока се извършва в трансформаторни подстанции чрез повишаващи и понижаващи трансформатори. В подстанциите освен силовите трансформатори са монтирани апаратите за комутация и средствата за измерване, защита и автоматика.

Частта от електроенергийната система, която служи за пренасяне и разпределение на енергията, се нарича електрическа мрежа. Тя се състои от електропроводите и трансформаторните подстанции. Според номиналното напрежение електрическите мрежи са за ниско напрежение (до 1000 V), за средно напрежение (6, 10 и 20 kV) и за високо напрежение (110 kV и повече). При мрежите за високо напрежение се увеличават загубите от коронен разряд (електрически разряд във въздуха около про-

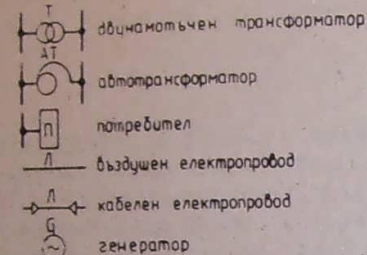
¹ При трифазна система номиналното напрежение е линейно напрежение.

водниите). Тези загуби се вземат предвид при проектирането на електропроводите за високо напрежение наред със загубите в съпротивлението на проводниците.

Принципната схема¹ на един клон от електрическа мрежа е показана на фиг. 1.9. Повишаващата трансформаторна подстанция 2 е близо до генераторите 1 в електрическата централа.



Условни означения



Фиг. 1.9. Принципна схема на един клон от електрическа мрежа

Г1 — генератор, Т1 — повишаваща подстанция, Л1 — преносен електропровод, Т2 — понижаваща подстанция, Л2 — разпределителен електропровод, Т3 — трансформаторен пост, Л3 — електропровод за ниско напрежение, П — потребители

Преносният електропровод 3 е свързан с понижаващата подстанция 4, а разпределителният електропровод 5 достига до трансформаторния пост 6, който чрез електропровод за ниско напрежение 7 захранва потребителите 8.

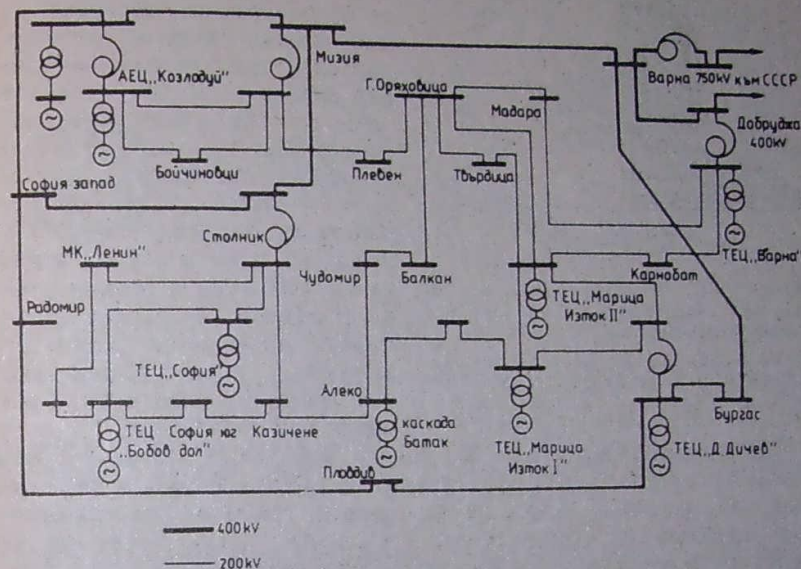
Електрическите мрежи се изпълняват така, че потребителите да бъдат захранени с електрическа енергия от няколко електропровода. С това се повишава надеждността на електроснабдяването при повреда на съоръженията (електропровод, трансформатор и др.).

На фиг. 1.10 е показана опростена схема на електроенергийната система на България. На нея са дадени основните централни, подстанции и преносни електропроводи. Номиналните напрежения, които се използват при пренасянето на електрическата

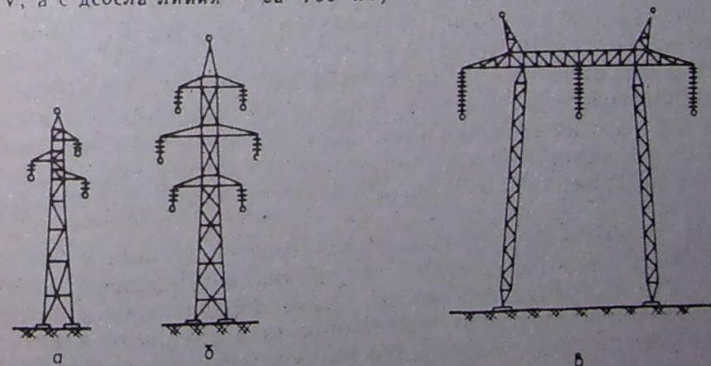
¹ В схемите се използват еднолинейни изображения и условни означения на елементите. В действителност всички елементи на мрежата са трифазни.

енергия у нас, са 220 и 400 kV. Електропроводите за връзка със Съветския съюз са на напрежение 400 и 750 kV.

Електропроводите са въздушни и кабелни. Въздушните мрежи се строят на открито. При тях се използват голи стоманено-алуминиеви проводници. Те имат стоманени вътрешни жиля, които повишават механичната якост. Външните жиля са алуминиеви



Фиг. 1.10. Опростена схема на електроенергийната система в Република България (с тънка линия са означени електропроводите за напрежение 220 kV, а с дебела линия — за 400 kV)

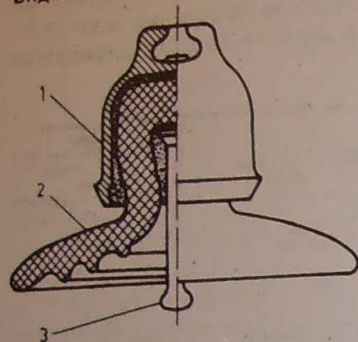


Фиг. 1.11. Конструкции на метални стълбове за различни номинални напрежения

а — 20 kV, б — 110 kV, в — 400 kV

и притежават добра електрическа проводимост и устойчивост на корозия.

При въздушните електропроводи се използват различни видове стълбове. На фиг. 1.11 са показани три конструкции на



Фиг. 1.12. Изолаторен елемент за висящи изолатори на въздушни електропроводи
1 — метална шапка, 2 — изолационно тяло, 3 — специален болт

метални решетъчни стълбове за различни номинални напрежения. Стълбовете от фиг. 1.13 б се използват за монтиране на два отделни трифазни електропровода, при което се намаляват разходите и се увеличава надеждността на електрозахранването. Проводниците са закачени върху стълбовете с помощта на изолатори. По такъв начин те са изолирани както помежду си, така и спрямо земята и стълбовете. В горния край на стълбовете са закрепени стоманени проводници, които са заземени. Те са разположени над фазовите проводници и ги защитават от мълнии.

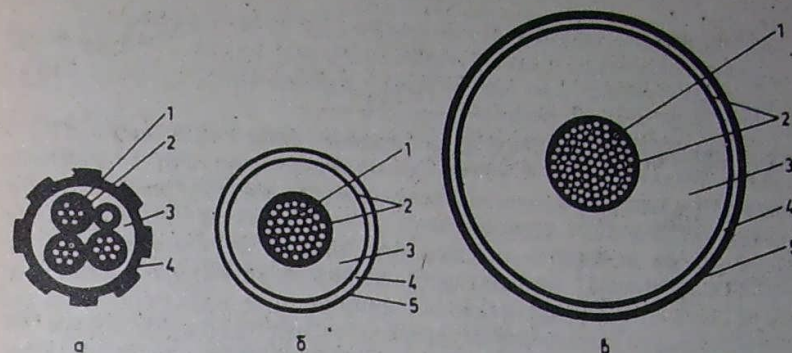
В електропроводите за високо напрежение се използват висящи изолатори, които се състоят от отделни елементи с възможност за шарнирно свързване във верига. Изолаторните елементи са изработени от порцелан или стъкло (фиг. 1.12). Броят им зависи от номиналното напрежение на електропровода.

С кабели се изграждат електроразпределителните мрежи за ниско и средно напрежение в населените места и в промишлените предприятия. Токопроводящите жила са многожични, изработени от мед или алуминий. В зависимост от броя им кабелите са едно-, дву-, три- и четирижични. За електрическа изолация на кабелните жила се използват кабелна хартия, каучукова смес или пластмаси. Дебелината и видът на изолацията зависят от номиналното напрежение (фиг. 1.13). Външно кабелите са предпазени от механични повреди, влага и корозия чрез подходящи обвивки. У нас кабели се произвеждат в завод „В. Коларов“ — Бургас.

Въздушните електропроводи се строят с по-малки капиталовложения от кабелните. При тях възникналите повреди се откриват и се отстраняват по-лесно. Обаче поради необходимостта от значителни изолационни разстояния за въздушните електропроводи е необходима сравнително голяма площ. Кабелните електропроводи се полагат непосредствено в земята или в специални канали. Те са независими от атмосферните влияния.

Сеченията на проводниците на електропроводите са стандар-

тизирани. Изборът на сечението и напрежението на дадена електрическа мрежа е технико-икономическа задача, при решаването на която са възможни различни варианти. Критерий за определянето на ефективността на приетия вариант е минимумът на



Фиг. 1.13 Напречен разрез на кабели за различни номинални напрежения

а — четирижичен кабел за ниско напрежение (до 1 kV); 1 — токопроводими жила, 2 — изолация на жилата (поливинилхлорид), 3 — пълнител, 4 — защитна обвивка; б — едножичен кабел за средно напрежение (20 kV); в — едножичен кабел за високо напрежение (110 kV); 1 — токопроводимо жило, 2 — електростатичен екран, 3 — изолация (полиетилен), 4 — броня (медна лента), 5 — защитна обвивка (поливинилхлорид)

сумата от капиталните вложения и разходите за експлоатация, отнесени за една година. Освен това се прави проверка за допустимото загряване на проводниците и допустимото изменение на напрежението в мрежата.

Изменение на линейното напрежение е разликата между линейните напрежения в началото и в края на електропровода. При симетрична трифазна система то е

$$(1.12) \quad \Delta U = U_1 - U_2 = \sqrt{3} Z I,$$

където Z е импедансът на една фаза на електропровода. Желателно е напрежението на потребителите да бъде равно на номиналното, т. е. $U_2 = U_n$. Това условие е трудноизпълнимо, тъй като изменението на напрежението зависи от тока, който се мени поради включването и изключването на потребители в мрежата. Отклонението на напрежението от номиналното оказва неблагоприятно влияние върху режима на работа на потребителите на електрическа енергия. Следователно промяната на този и други параметри трябва да бъде ограничена в допустими граници. По такъв начин се осигурява качеството на електрическата енергия. От-

клонението на напрежението в процент от номиналното се определя от израза

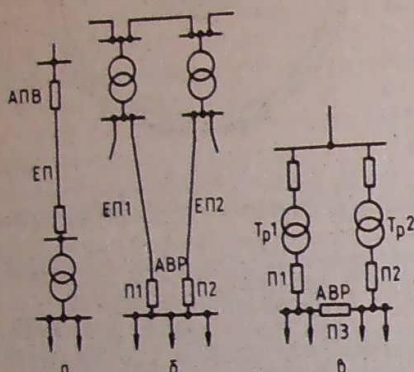
$$(1.13) \quad \Delta u = \frac{U_2 - U_n}{U_n} 100 \%$$

Нормирани са следните допустими стойности на Δu :

за осветлението в промишлени предприятия: от $-2,5$ до $+5\%$;
за напрежението на електрическите двигатели: от -5 до $+10\%$;
за останалите потребители: $\pm 5\%$;

Допустимото отклонение от номиналната честота (50 Hz) е $\pm 0,1$ Hz. По подобен начин са нормирани допустими стойности за несиметрията на напреженията при трифазна система, за отклонението на формата на напрежението от синусоидната и др.

Голямо е значението на надеждността на енергийната система за непрекъснатото снабдяване на потребителите с електрическа енергия. Надеждността се оценява с вероятностни показатели, тъй като отказите на съоръженията възникват под действието на случайни фактори. При определяне на оптимални показатели за надеждност трябва да се имат предвид следните основни съображения. От една страна,



Фиг. 1.14. Принципиални схеми на устройства за автоматично повторно включване — АРВ (а), и за автоматично включване на резервното захранване — АРВ (б, в)

повишаването на надеждността е свързано с увеличаване на капиталовложенията (например за изграждане на няколко електропровода, които захранват големи и отговорни потребители на електроенергия). От друга страна, недостатъчната надеждност води до значителни загуби при прекъсване на електроснабдяването и спиране на производството.

Непрекъснатото електроснабдяване на потребителите се осигурява с релейната защита и автоматизацията на електроенергийната система, която е система от устройства, предназначени да изключват повредени участъци на мрежата, да защитават електрическите съоръжения и др. Към тях се отнасят устройствата за автоматично повторно включване (АРВ), които служат за ликвидация на преходни къси съединения. При поява на късо съединение през електрическа дъга АРВ изключва кратковременно електропроводът ЕП (фиг. 1.14 а). През безтоковата пауза дъгата загасва, а диелектричните свойства на изолацията в мястото

на късото съединение се възстановяват. След автоматичното повторно включване на прекъсвача продължава нормалната работа на потребителите, които почти не усещат моментното прекъсване на захранването. Ако късото съединение е трайно, релейната защита изключва окончателно електропровода.

Принципът на автоматичното включване на резервното захранване (АРВ) може да се обясни с помощта на фиг. 1.14 б и в. Подстанцията, показана на фиг. 1.14 б долу, е захранена от работния електропровод ЕП1, докато електропроводът ЕП2 е резервен (прекъсвач П2 е изключен). При повреда на ЕП1 автоматично чрез АРВ се изключва прекъсвачът П1, след което се включва П2 и потребителите се захранват от ЕП2.

Трансформаторите в подстанцията на фиг. 1.14 в се резервират взаимно. Те захранват две групи потребители (прекъсвачът П3 е изключен). При повреда в който и да е от двата трансформатора уредбата за АРВ го изключва и включва П3. Така всички потребители се захранват от работещия трансформатор.

Според терминологията на кибернетиката електроенергийните системи спадат към категорията на големите системи. Те съдържат много голям брой взаимосвързани елементи. По различни причини в системата се получават големи и малки смущения — къси съединения, изключване и включване на електропроводи, трансформатори и генератори, изменение на натоварването и т. н. Под влияние на смущенията състоянието на системата се променя непрекъснато. Колебят се напрежението и честотата, изменят се енергийните потоци по електропроводите и др.

Съвременните електроенергийни системи притежават висока степен на организираност благодарение на автоматичното управление. С него се постига *устойчивост* на електроенергийната система. Това е свойство на системата да се връща в изходното си установено състояние след извеждането ѝ от него поради смущаващи въздействия. По такъв начин се запазва целостта на системата, осъществява се непрекъснат баланс на произведената и консумираната електрическа енергия и се регулират в определени граници напрежението и честотата.

При изучаване на енергийната система различните видове преобразуватели на електрическа енергия в друг вид енергия бяха наречени *потребители*. Такива са електрическите двигатели, които превръщат електрическата енергия в механична, електрическите нагреватели и пещи превръщат електрическа енергия в топлина, електрическите лампи — в светлина и др. Терминът потребител се използва и за по-големи единици, обединени с общ технологичен или административен признак, например промишлени предприятия, електрически транспорт, битови потребители и др.

Загубите на мощност при пренасяне на електрическата енер-

гия зависят от коэффициента на мощността $\cos \varphi$, който може да се изрази чрез активната мощност P и пълната мощност S :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.14)$$

След като се замести S от (1.14) в (1.11), се получава

$$P = \frac{P^2}{U_d^2 \cos^2 \varphi} R \quad (1.15)$$

Вижда се, че при еднакви други условия загубите на мощност в електропровода P са обратнопропорционални на коэффициента на мощността в квадрат. Оттук следва, че с повишаване на $\cos \varphi$ съществено се намаляват експлоатационните разходи при доставянето на електрическа енергия на потребителя. При изясняване на възможностите за подобряване на $\cos \varphi$ трябва да се има предвид, че в промишлеността работят много голям брой асинхронни двигатели, които консумират от мрежата активна и реактивна (индуктивна) енергия. Стойността на $\cos \varphi$, с който работи асинхронният двигател, зависи от степента на натоварването му (вж. гл. VII). Когато асинхронният двигател е натоварен с мощност, по-малка от номиналната, коэффициентът на мощността му намалява. Следователно, за да се повиши $\cos \varphi$, е необходимо:

- при проектиране на електрозадвижването да се избират асинхронни двигатели с мощност, много близка до мощността, необходима за задвижване на работния механизъм;

- производството да се организира така, че да се сведе до минимум делът на асинхронните двигатели, работещи с по-малък товар от номиналния;

- да се използват синхронни двигатели вместо асинхронни в случаите, когато задвижването позволява това.

Другата възможност за повишаване на $\cos \varphi$ е да се произведе необходимата реактивна мощност (или част от нея) при самите потребители. Този метод се нарича *компенсиране на реактивната мощност*. Източник на реактивна мощност в електрическите мрежи за ниско напрежение са предимно кондензаторните батерии, които се свързват паралелно на мрежата в промишлените предприятия.

Рационалното използване на електрическата енергия има съществено влияние върху икономическите показатели на електроенергийната система, тъй като загубите на енергия в електрическата мрежа са около 10% от общата произвеждана енергия.

2

Електрически контакт и електрическа дъга

2.1. Общи сведения

Електрически контакт е състоянието на допир между два проводника, които са част от електрическа верига. Двата проводника, между които се получава електрически контакт, се наричат *контактни тела*, а тяхната съвкупност — *контактно съединение*. Силата, с която се притискат контактните тела, се нарича *контактна сила*.

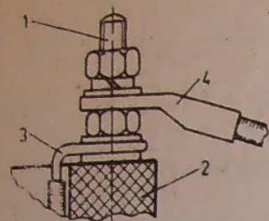
Всяка електрическа верига съдържа много контактни съединения. Чрез тях се свързват отделните елементи на веригата и е възможно преминаването на електрически ток. Явленията при контактуването се изследват и във връзка с необходимостта от включване и изключване на електрическите вериги. Затварянето или отварянето на веригата се нарича *комутация* и се извършва предимно с помощта на контактни апарати. При комутационните операции проводимостта на електрическата верига се променя дискретно.

В електрическите съоръжения се използват различни видове контактни съединения. От тяхната сигурна работа до голяма степен зависи надеждността на апаратите и съоръженията при експлоатация. Контактните съединения се класифицират по различни признаци. Например според стойността на номиналния ток те се разделят на групи от няколко микроампера до стотици килоампери.

В зависимост от конструкцията и предназначението контактните съединения се групират, както следва.

1. **Неподвижни контактни съединения**
При тях се осъществява трайно контактено съединение, което работи само във включено състояние. Неподвижните контактни съединения са неразглобяеми и разглобяеми. Контактните тела на неразглобяемите съединения се свързват чрез нитове, болтове, заваряване, спояване, пресоване, усукване. Прилагат се за най-различни стойности на номиналния ток. Контактни съединения от този тип се използват за свързване на шини, кабели и провод-

ции на електропроводи в електрическите централи, подстанции и мрежи, в електрически инсталации в промишлените предприятия и др. Контактни съединения, получени чрез спояване, претия и др. Контактни съединения, получени чрез спояване, претия и др. Контактни съединения, получени чрез спояване, претия и др.



Фиг. 2.1 Клема на електродвигател за ниско напрежение

1 — клемен болт, 2 — клемно табло, 3 — извод на намотката, 4 — кабелен накрайник на външния проводник

външните проводници към него. На фиг. 2.1 е показана клема на електродвигател за ниско напрежение. Клемният болт 1 е запресован в клемното табло 2. Изводът на намотката 3 е притогнат към клемния болт чрез подложна шайба и гайка. Кабелният накрайник 4 на външния проводник е присъединен чрез още една подложна шайба и гайка, която е осигурена от саморазвиване с пружинна шайба.

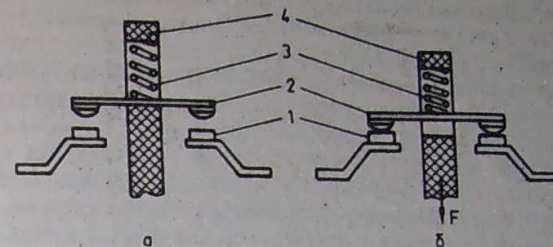
2. Щепселни контактни съединения

Щепселните контактни съединения са част от устройства за прекъсваема връзка в електрически вериги. Използват се в жилищни и промишлени инсталации за свързване на еднофазни и трифазни вериги, за захранване на електроуреди и съоръжения. В тези случаи щепселните контактни съединения се изпълняват за следните номинални токове: 1, 2,5, 6, 10, 16 и 25 А. От гледна точка на безопасността е важно наличието на такива съединения да позволява бързо и лесно видимо разединяване на веригата. Прилагат се само във вериги за ниско напрежение при променлив или постоянен ток. Щепселните контактни съединения комутират вериги без ток или с ток, не по-голям от номиналния. Те са предназначени да работят продължително във включено положение и затова допустимият брой на комутационните цикли е сравнително малък.

В устройствата на електрониката, изчислителната техника и др. се използват многополюсни щепселни контактни съединения, които свързват голям брой електрически вериги между отделните елементи и модули. Възможността за прекъсваеми връзки създа-

ва редица предимства при производство, настройване, изпитване, диагностика и ремонт на комплектните изделия.

Контактните тела на щепселните съединения са щифтове и контактни втулки, в които се вкарват щифтовете. Последните



Фиг. 2.2 Контактна система при изключено (а) и включено (б) състояние

1 — неподвижни контактни тела, 2 — подвижни контактни тела, 3 — пружина, 4 — контактен носач

трябва да имат пружинно действие, за да се осигури контактната сила.

3. Подвижни контактни съединения

С подвижни контактни съединения са снабдени комутационни апарати, които се характеризират с голямо разнообразие и имат значително приложение. При тях контактните тела се преместват едно спрямо друго. Контактните тела образуват *контактната система* и чрез допиране или отделяне вземат участие в комутацията на електрическата верига. Контактната система има две положения: изключено и включено.

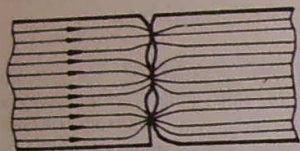
На фиг. 2.2 е показана контактна система, която се използва в контакторите за променлив и постоянен ток. При нея се получава прекъсване на веригата на две места, което благоприятства дългогасителните процеси. При изключено положение (фиг. 2.2 а) подвижните контактни тела 2 са отдалечени от неподвижните контактни тела 1. При включване (фиг. 2.2 б) контактният носач 4 извършва постъпателно движение, при което подвижните контактни тела се допират до неподвижните. Пружината 3 осигурява контактната сила, необходима за нормалната работа на системата.

При *плъзащите контактни съединения* едното контактно тяло се движи спрямо другото — плъзга се, без да се отделя от него. Чрез плъзгащи контактни съединения става захранването на електрическите транспортни средства (електрически локомотиви, трамваи, тролейбуси, метро). Електродвигателите на мостовите кранове, които работят в цеховете на някои промишлени предприятия, са захранени от трифазна система напрежения чрез

плъзгащи се контакти. Плъзгащ се контакт съществува между четките и колектора при колекторните електрически машини за постоянен и променлив ток или между четките и контактните пръстени при синхронните машини и асинхронните двигатели с фазов ротор.

2.2. Явления в електрическия контакт. Контактни материали

Големината на контактната сила, видът на контактната повърхност и материалът на контактните тела се избират в зависимост от номиналните технически данни и предназначението на контактното съединение. За изучаване на явленията в електрическия контакт важно значение има въпросът за действителната допирна площ. Поради микронеравностите на контактните повърхности допирането става само в отделни точки, наречени контактни петна. Броят на контактните петна зависи от грапавостта на контактната повърхност, от качествата на материала на контактните тела, от замърсяването и окисляването, от големината на контактната сила и



Фиг. 2.3. Увеличаване на токовата плътност в зоната на електрическия контакт поради наличието на контактни петна

от други фактори. Действителната площ, през която протича ток, е много по-малка от площта, определена чрез геометричните размери на контактните тела. Увеличаването на токовата плътност в преходната зона на електрическия контакт предизвиква повишаване на съпротивлението в този участък (фиг. 2.3). По такъв начин се обяснява възникването на *контактно съпротивление* R_k . То има две съставки. Едната е свързана със състоянието на контактната повърхност ($R_{пов}$), а другата се дължи на деформацията на токовите линии в преходния слой ($R_{пр}$):

$$(2.1) \quad R_k = R_{пов} + R_{пр}.$$

Възможността за точно изчисляване на контактното съпротивление е ограничена поради сложната зависимост от голям брой фактори. За практически цели може да се използва формулата

$$(2.2) \quad R_k = \frac{k}{F_k^m},$$

където F_k е контактната сила, а коефициентът k зависи от материала на контактните тела.

Коефициентът m се определя от конструкцията на контактното

съединение и има различни стойности за точков, за линейен и за повърхностен контакт.

Съществуването на контактно съпротивление има следните следствия. При ток I в контактното съпротивление се отделя топлина съответно на загубите $p_k = R_k I^2$. Ако в процеса на експлоатация се увеличи контактното съпротивление, например поради намаляване на контактната сила, температурата може да се повиши недопустимо. Създават се условия за окисляване на контактната повърхност и повреда на контактното съединение.

При много големи токове, например при късо съединение, е възможно температурата на допирните точки в контактната система да се увеличи до такива стойности, че да се получи разтопяване на материала и заваряване на контактните тела. Това нежелателно явление може да се избегне чрез правилно проектиране на комутационните апарати.

Високата температура в преходния контактен слой има полезно технологично приложение за заваряване на токопроводими детайли с помощта на уредби за електроконтактно заваряване.

Некачествените контактни съединения предизвикват смущения в нормалната работа на електрическите вериги с много малки токове. Тъй като токът е малък, не се получава недопустимо загряване на контактното съединение, но падът на напрежение в контактното съпротивление $\Delta U_k = R_k I$ може да бъде относително голям. В схемите на микроелектрониката се среща прекъсване на вериги поради лоши контакти, например в перата на щепселните съединители, в т. нар. студени спойки и др.

Качеството на контактното съединение се проверява опитно чрез измерване на пада на напрежение в контактното съпротивление. Обикновено при номинален ток ΔU_k не превишава 2—5 mV. Основните предпоставки за малка стойност на контактното съпротивление са добро състояние на допирните повърхности и достатъчно голяма контактна сила. Важно значение има изборът на подходящи материали за контактните тела.

Контактните тела се изработват от *метали, метални сплави и металокерамични материали*. Те трябва да притежават по възможност голяма електрическа проводимост, за да се получи малко контактно съпротивление. Контактните материали трябва да имат добра топлопроводимост, за да се намали температурата в зоната на допирането. При подвижните контактни съединения едно от най-важните свойства на контактния материал е устойчивостта срещу действието на електрическата дъга. Всички тези изисквания не могат да бъдат изпълнени едновременно.

Медта намира приложение във всички видове контактни съединения. Месингът се използва в щепселните съединения и някои клемни съединения. Най-голямо е разнообразието на материалите, от които се изработват подвижните контактни съединения. Техните контактни тела са от мед, сребро и сплавите им в зависимост

от предназначението, конструкцията и особеностите на дъгогасителните процеси. За да се увеличи износоустойчивостта, се използват сплави на мед, сребро и кадмий, сребро—паладий, сребро—волфрам, мед—волфрам и др. Основната съставка (сребро, мед) е с висока електрическа проводимост, а легиращата добавка — с по-голяма температура на топене или по-голяма твърдост. Така се получават износоустойчиви контактни тела с малко контактно съпротивление.

Галваничните покрития подобряват качествата на контактната повърхност и я предпазват от окисляване. Най-малки са контактните съпротивления при покрития с благородни метали (злато, платина). Понеже са скъпи, те се прилагат само за отговорни контактни съединения при малки токове — от порядъка на милиампери. По-разпространени са посребряването, кадмирането и никелирането.

Металокерамичните контактни тела се изработват чрез безотпадни технологии по методите на праховата металургия. Техните характеристики зависят от състава и свойствата на отделните компоненти. С добри качества са композициите от сребро—кадмиев окис, сребро—графит и др. Устойчиви са на заваряване и износване.

2.3. Електрическа дъга при постоянен и променлив ток

Експлоатацията на комутационните апарати е свързана с често включване и изключване на контактните им системи. При изключване на електрическа верига с ток между контактните тела възниква електрическа дъга. Тя е вид електрически разряд в газова среда, при който между двойката раздалечени контактни тела протича ток. Носители на тока в канала на дъгата са електрони, йони и метални пари. Високата температура на плазмата в канала (над 6000 °C) предизвиква термична йонизация. Под действие на електрическото поле, създадено от електродите (двойката контактни тела), се получава насочено движение на заредените частици. Едновременно с йонизацията в канала на дъгата се извършват и процеси на дейонизация. Те се дължат на охлаждането на дъгата (намалява се температурата), на дифузия (заредени частици излизат извън канала) и на рекомбинация (неутрализиране на зарядите).

Проблемите на дъгогасителните процеси са важни за практиката. Дъговите разряди причиняват окисляване, разтопяване и загуба на контактния материал поради изпаряване и разпръскване в околното пространство. Дълготрайността на контактната система се оценява чрез нейната електрическа износоустойчивост. Това е способността на контактните тела, изразена чрез броя

на комутационните цикли, които те могат да извършат и след това да останат в определено състояние. Изпитването за проверка на електрическата износоустойчивост се провежда, като се комутират токове във вериги със зададени параметри и режими, посочени в стандартизационните документи на отделните видове комутационни апарати.

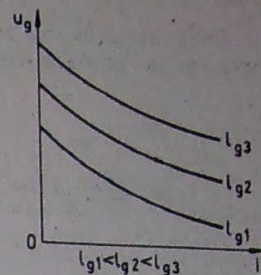
При включване и изключване на електрически вериги се появяват комутационни пренапрежения. Те превишават номиналните напрежения на електрооборудованията и представляват опасност за izolацията им. Големината на тези пренапрежения зависи от дъгогасителните процеси в комутационните апарати и от параметрите на веригата. Изучаването на дъговите процеси е необходимо и във връзка с приложението им в уредбите за електродъгово заваряване, електроискрова обработка и други технологични методи.

Електрическата дъга може да се разглежда като цилиндричен газов проводник, който свързва двете контактни тела при раздалечаването им. Съпротивлението на дъгата r_d зависи от нейната дължина l_d и от тока през дъгата i . На фиг. 2.4 са показани характеристики $u_d = f(i)$ на постояннотокова дъга. При по-големи токове температурата на плазмата и степента на йонизация в канала на дъгата са големи, а съпротивлението r_d е много малко. Поради това напрежението на дъгата $u_d = r_d i$ е по-малко. Обратно, с намаляване на тока се увеличава степента на дейонизация, а съпротивлението и напрежението на дъгата нарастват (при $l_d = \text{const}$). Когато дъгата се удължава (на фиг. 2.4 $l_{d1} < l_{d2} < l_{d3}$), съпротивлението r_d и напрежението u_d се увеличават (при $i = \text{const}$).

Най-напред ще бъде разгледана постояннотокова електрическа верига с напрежение U , която се състои от последователно свързани резистор със съпротивление R , индуктивен елемент с индуктивност L и контактна система (фиг. 2.5). Процесът на изключване на веригата се изследва с помощта на уравнението

$$(2.3) \quad U = Ri + L \frac{di}{dt} + u_d.$$

Тъй като зависимостта на напрежението на дъгата от тока е нелинейна, трябва да бъде известна характеристиката $u_d = f(i)$. За да се изгаси дъгата за време t_d , е необходимо да се създадат условия, при които токът във веригата намалява непрекъснато от началната си стойност до нула:

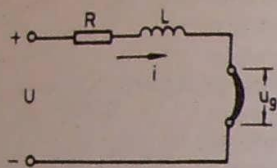


Фиг. 2.4. Характеристики $u_d(i)$ при различна дължина на постоянно-токова дъга

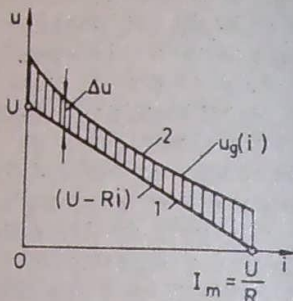
$$(2.4) \quad i_{t=0} = I_m = \frac{U}{R};$$

$$i_{t=t_d} = 0.$$

Следователно, за да се угаси дъгата ($i \rightarrow 0$), производната на тока трябва да бъде отрицателна. От (2.3) следва



Фиг. 2.5. Схема на верига за постоянен ток при изключване



Фиг. 2.6. Към определяне на условието за гасене на електрическа дъга при постоянен ток

$$(2.5) \quad L \frac{di}{dt} = (U - Ri) - u_d < 0.$$

Тогава условието за гасене на постояннотоковата дъга е

$$(2.6) \quad |U - Ri| < u_d.$$

Това условие е илюстрирано на фиг. 2.6. Правата 1 представлява лявата страна на неравенството (2.6) в границите на изменение на тока, зададени от (2.4). Дясната страна на неравенството (2.6) е изобразена чрез характеристиката на дъгата $u_d = f(i)$ — крива 2. Следователно за всяка стойност на тока дъгогасителното устройство на комутационния апарат трябва да осигури характеристика 2, която е разположена над правата 1. Тогава се получава

$$(2.7) \quad \Delta u = |(U - Ri) - u_d| = \left| L \frac{di}{dt} \right|.$$

Времето за изгасяване на дъгата може да се определи от последното уравнение:

$$(2.8) \quad t_d = L \int_{I_m}^0 \frac{di}{\Delta u}.$$

Дъгата се гаси сигурно и бързо при по-големи стойности на Δu . Това се постига чрез изместване на характеристиката 2 над правата 1, например чрез удължаване на дъгата (сравни фиг. 2.6 и 2.4).

В момента на загасяване на дъгата ($i=0$, $t=t_d$) от (2.3) може да се определи напрежението между контактните тела:

$$(2.9) \quad u_d \Big|_{t=t_d} = U + L \frac{di}{dt} \Big|_{t=t_d}.$$

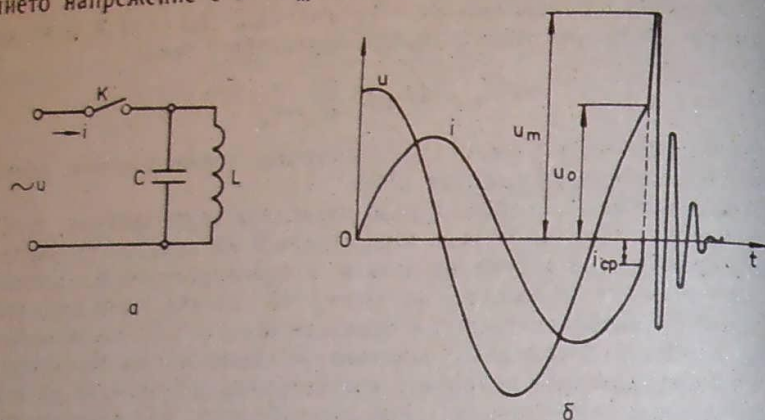
Вижда се, че във веригата се получава пренапрежение, което се дължи на втория член на (2.9).

Анализът на (2.7), (2.8) и (2.9) позволява да се направят следните изводи. При по-голяма индуктивност на контура се увеличават времето на горене на дъгата и пренапрежението. Колкото по-голяма е скоростта на гасене на дъгата (производната на тока), толкова по-голямо е пренапрежението при изключването на веригата. Последното означава, че стремейт за проектиране на комутационни апарати с краткотрайно действие на дъгата и увеличена електрическа износоустойчивост на контактната система трябва да се съобразява с допустимите пренапрежения от гледна точка на izolацията.

Процесите на гасене на постояннотоковата и променливотоковата дъга се различават съществено. Електрическата дъга при променлив ток се гаси по-лесно от тази при постоянен ток. Променливият ток периодично се анулира независимо от процесите в дъгата. В момента, когато токът стане нула, притокът на енергия към контактната система се прекратява, температурата на плазмата и на контактните тела намалява и са налице благоприятни условия за дейонизация на дъгата. В същия момент започва преходен процес, при който едновременно се възстановяват напрежението между раздалечените контактни тела и диелектричната якост на междината между тях. Окончателното изгасяване на дъгата зависи от съотношението между тези две величини. Ако при първото анулиране на тока след отделянето на контактните тела напрежението между тях стане равно на диелектричната якост на контактната междина, дъгата се запалва отново през следващия полупериод. Ако след загасяването на дъгата диелектричната якост между контактните тела е по-голяма от напрежението между тях, дъгата не се запалва повторно.

Дъгогасителните устройства на съвременните комутационни апарати имат висока ефективност. Затова дъгата се гаси през първия полупериод след отварянето на контактната система. При повечето комутационни апарати се получават условия за дейонизация на дъгата, преди токът да достигне нулевата си стойност. Моментната стойност на тока, при която загасва дъгата след изключването на комутационния апарат, се нарича ток на сръзване. Поради ефекта на сръзване на тока в променливотоковите

електрически мрежи се появяват при изключване комутационни пренапрежения със значителни стойности. На фиг. 2.7 а е показана еднофазна електрическа верига, чието напрежение е $u = U_m \sin \omega t$. След изключването на контура



Фиг. 2.7. Схема на еднофазна верига за променлив ток (а) и пренапрежение, дължащо се на срязването на тока при изключването ѝ (б)

от паралелно свързани индуктивност L и капацитет C протича колебателен процес без затихване. От енергийния баланс в момента на изключването следва

$$(2.10) \quad \frac{1}{2} C u_0^2 + \frac{1}{2} L i_{cp}^2 = \frac{1}{2} C u_m^2.$$

Тук u_0 е моментната стойност на напрежението u в момента на загасване на дъгата, а i_{cp} — токът на срязване. От (2.10) се получава максималната стойност на пренапрежението

$$(2.11) \quad u_m = \sqrt{u_0^2 + (Z i_{cp})^2},$$

където

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

След изключването напрежението се колебае с честота, равна на собствената честота на контура:

$$(2.12) \quad f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

На практика колебателният преходен процес затихва бързо поради наличието на активно съпротивление (фиг. 2.7 б). Дъгогасителните процеси в комутационните апарати за ниско и високо напрежение се различават съществено. Те зависят от вида на дъгогасителното устройство.

2.4. Дъгогасителни устройства

Дъгогасителното устройство е съставна част на комутационните апарати. То създава условия за гасене на електрическата дъга чрез ускоряване на дейонизацията. От (2.6) следва, че действието на дъгогасителното устройство трябва да предизвиква горене на дъгата при по-високо напрежение u_d . Някои от съществуващите методи и устройства за гасене на дъгата са разгледани по-долу.

1. Гасене чрез естествено удължаване на дъгата

Този метод се прилага предимно при променливотокови комутационни апарати за ниско напрежение с относително малък номинален ток (до около 60 А). При изключване дъгата се удължава поради увеличаване на разстоянието между подвижното и неподвижното контактно тяло. Освен това дъгата се разтяга под действието на електродинамичните сили, образувани от взаимодействието на тока в дъгата и в останалите части на контура. Удължаването на дъгата води до увеличаване на съпротивлението ѝ, а чрез него — и на u_d . Дъгата се охлажда чрез движението на нагорещения въздух (естествена конвекция). Описаното дъгогасене не е особено ефективно, но води до евтини конструкции. То се прилага в лостовите и пакетните прекъсвачи.

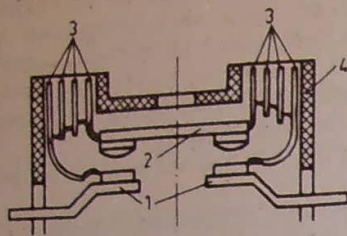
2. Гасене чрез дъгогасителни камери

Дъгогасителните камери се изработват от огнеупорна керамика и дъгоустойчиви пластмаси. Те запазват електроизолационните си качества въпреки действието на краткотрайните и неравномерни нагрявания от високата температура на дъгата. Съществуват два типа дъгогасителни камери — с тесни канали и с дейонна решетка.

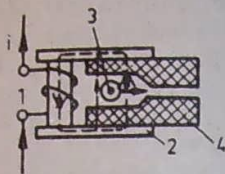
При дъгогасителните камери с тесни канали дъгата се разтяга от електродинамични сили и от термосинфонния ефект поради загряването на въздуха. Тя принудително навлиза в зоната на тесния канал, допира се до стените на камерата, охлажда се, дейонизира се и загасва. Такива камери се употребяват при някои контактори и автоматични прекъсвачи.

Примерно изпълнение на дъгогасителна камера с дейонна решетка е показано на фиг. 2.8. Контактната система е същата като показаната на фиг. 2.2. В стените на камерата 4 са вградени стоманените пластини 3, които образуват дейонната решетка. При изключване между неподвижното контактно тяло 1 и подвижното контактно тяло 2 се запалва дъга. Под влиянието на електродинамичните сили дъгата се премества в зоната на пластините 3 и се разделя от тях на няколко къси дъги. Между двете контактни тела и n броя стоманени пластини се получават $n+1$ къси дъги. Така на фиг. 2.8 вместо по една дъга на всяка

контактна междина се получават по 5 къси дъги. Тези дъги горят независимо една от друга и са свързани последователно. Сумарното напрежение на дъгата се увеличава на $(n+1)u_d$. Дъгата се дейонизира и гаси.



Фиг. 2.8. Дъгогасителна камера с дейонна решетка
1 — неподвижни контактни тела,
2 — подвижни контактни тела, 3 — стоманени пластини, 4 — камера



Фиг. 2.9. Гасене на дъгата с магнитно поле
1 — дъгогасителна бобина, 2 — магнитопровод, 3 — електрическа дъга, 4 — дъгогасителна камера с тесен канал

Дъгогасителните камери с дейонна решетка се използват при комутационните апарати за променлив ток.

3. Гасене с помощта на магнитно поле

В някои комутационни апарати, за да се изгаси по-бързо дъгата, се възбужда магнитно поле от специална бобина с няколко навивки, свързана последователно с контактната система. Този вид дъгогасене е показан на фиг. 2.9 за постояннотоков контактор. Бобината 1 е навита върху стоманено ядро, което заедно с двете стоманени пластини образува магнитопровода 2. Контактната система е разположена така, че каналът на дъгата 3 да е перпендикулярен към линиите на магнитното поле. От взаимодействието на магнитното поле и тока в дъгата се получава електродинамична сила, чиято посока може да се определи по правилото на лявата ръка. Силата е насочена така, че да разтегля дъгата и да я премества в тесния канал на дъгогасителната камера 4, където дъгата се дейонизира и гаси.

При някои типове променливотокови контактори за високо напрежение дъгогасенето с помощта на магнитно поле е съчетано с използването на дейонна решетка. Ефективността на процеса на гасене е голяма, тъй като значително се увеличава скоростта на преместване на дъгата спрямо решетката и стените на камерата.

4. Други видове дъгогасителни устройства

В променливотоковите комутационни апарати за високо напрежение се използват редица дъгогасителни устройства с доказана висока ефективност, които са способни да изключат много

големи мощности при къси съединения в електрическите мрежи. Названията на съответните прекъсвачи са свързани с методите за гасене на дъгата.

Маслени и маломаслени прекъсвачи

При първите трансформаторното масло служи за гасене на дъгата и за осигуряване на необходимата изолация на тоководещите детайли. При вторите маслото се използва като дъгогасително средство и за изолация между контактните тела при отворена контактна система. Високата температура на дъгата предизвиква изпаряване и разлагане на трансформаторното масло. Около контактните тела се образува парогазов мехур, който охлажда, дейонизира и гаси дъгата.

Въздухоструйни прекъсвачи

При тях за гасене на дъгата се използва сгъстен въздух, който се получава от специални пневматични уредби. При изключване сгъстеният въздух охлажда и издухва дъгата. Постъпването на свеж, нейонизиран въздух способствува за възстановяването на висока диелектрична якост между контактните тела.

Вакуумни прекъсвачи

Контактните тела на всяка от трите фази са разположени в отделни вакуумни камери. Вакуумът има силно дейонизиращо действие и дъгата се гаси много бързо.

Елегазови прекъсвачи

Камерите на тези прекъсвачи са запълнени със SF_6 (серен хексафлуорид) — газ с много добри диелектрични и дъгогасителни свойства.

3.1. Общи сведения

Основен елемент в електромагнитните механизми е електромагнитът. Електромагнитът в най-общ смисъл е устройство, при което чрез електрически ток, протичащ през намотка, се възбужда магнитно поле. Електромагнитите са разпространени широко в практиката. Използват се в електрическите апарати за възбуждане на магнитно поле и за осъществяване на постъпателно или въртливо движение. В електрическите машини електромагнитите се използват за възбуждане на магнитното поле, необходимо за преобразуване на енергията.

Устройство и принцип на действие. Електромагнитът се състои от две части — възбудителна намотка и магнитопровод. Намотката на електромагнита е навита от изолиран проводник върху скелет с кръгло, квадратно или правоъгълно сечение.

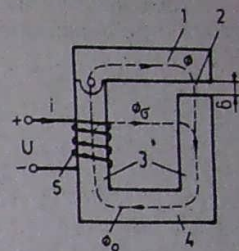
Магнитопроводът представлява пътят, в който се „канализира“ магнитният поток. Той се изработва от феромагнитен материал (стомана). Магнитният поток се развива главно във феромагнитна среда, защото нейната магнитна проникваемост $\mu \gg \mu_0$. Магнитопроводът включва и немагнитен участък, наричан въздушна или работна междина. Тя е необходима за свободното движение на някоя подвижна част от магнитната верига или за движение в нея на електропроводими материали, в които се индутира е. д. н.

При протичане на ток през намотката в магнитопровода и въздушната междина се възбужда магнитно поле, което причинява силови действия или се използва за други цели.

3.2. Тягова сила на електромагнита

3.2.1. Електромагнит за постоянен ток

Принципната конструктивна схема на електромагнита е показана на фиг. 3.1, където 1 — котва, 2 — въздушна междина, 3 — ядра, 4 — ярем, 5 — намотка. Електромагнитната сила, с която подвижната част, наречена котва, се притегля към неподвижната част на електромагнита, се нарича *тягова сила*. Съгласно принципите на електромеханичното преобразуване на енергията, разглеждани в теоретичните основи на електротехниката, електромагнитната сила F се определя като производна на магнитната енергия във въздушната междина W_m по координатата на възможното преместване, например x . Силата е притегателна и е насочена към увеличаване на енергията, т. е. към намаляване на въздушната междина δ .



Фиг. 3.1. Принципна конструктивна схема на електромагнит за постоянен ток

$$(3.1) \quad F = \left(\frac{dW_m}{dx} \right)_{i=\text{const}} = - \left(\frac{dW_m}{d\delta} \right)_{i=\text{const}},$$

където $dx = -d\delta$.

Тъй като магнитната енергия е

$$(3.2) \quad W_m = \frac{1}{2} Li^2,$$

а индуктивността на намотката

$$(3.3) \quad L = \frac{\omega^2}{R_m} = \omega^2 G_m,$$

за електромагнитната сила следва зависимостта

$$(3.4) \quad F = - \frac{i^2 \omega^2}{2} \cdot \frac{dG_m}{d\delta},$$

където i е токът на електромагнита, ω — броят на навивките на намотката му, а R_m и G_m са магнитното съпротивление и магнитната проводимост на въздушната междина.

В най-простия случай на равномерно поле, което може да се осъществи при малка въздушна междина δ и голямо сечение S

на полюсите, магнитната проводимост и нейната производна ще бъдат

$$(3.5) \quad G_m = \frac{\mu_0 s}{\delta}; \quad \frac{dG_m}{d\delta} = -\frac{\mu_0 s}{\delta^2}.$$

Тогава за силата се получава

$$(3.6) \quad F = \frac{i^2 \omega^2 \mu_0 s}{2 \delta^3} = \frac{\Phi^2}{2 \mu_0 s} = \frac{B^2 s}{2 \mu_0},$$

където Φ е работният магнитен поток, B — магнитната индукция във въздушната междина.

Зависимостта на електромагнитната сила от въздушната междина при константен ток се нарича *статична тягова характеристика* на електромагнита. Тя се дава от (3.6) и следва да се определя от установения ток след завършване на преходния процес на включване. Това означава, че например при измерването на силата е необходимо за всяко положение на котвата (за всяко δ) да се изчака да затихне електромагнитният преходен процес.

Интересна е също квадратичната зависимост на F от i , т. е. от Φ или от B . Това отразява факта, че посоката (знакът) на силата не зависи от посоката (знака) на тока и потока.

Фиг. 3.2. Статична тягова характеристика на електромагнит

На фиг. 3.2 е показана типичната статична тягова характеристика. Теоретичната крива е квадратична хипербола, като при $\delta \rightarrow \infty$, $F \rightarrow 0$, а при $\delta \rightarrow 0$ $F \rightarrow \infty$. Последното е практически невъзможно, защото при $\delta = 0$ индукцията има крайна стойност, определена от магнитната проводимост при привлечена котва.

За да е възможно движението, тяговата характеристика трябва да бъде разположена над характеристиката на противодействащите елементи — възвратната пружина, контактната пружина, контактните тела и др.

3.2.2. Електромагнит за променлив ток

Индуктивно съпротивление на електромагнита. Като се има предвид формулата за индуктивното съпротивление на една намотка $X_L = \omega L$, от (3.3) и (3.5) следва,

$$(3.7) \quad X_L = 2\pi f \omega^2 G_m = 2\pi f \omega^2 \frac{\mu_0 s}{\delta},$$

където $\omega = 2\pi f$ е кръговата честота на променливия ток.

Оттук не е трудно да се определи и токът на електромагнита $I = \frac{U}{Z}$, където U е приложеното напрежение, а Z — импедансът на електрическата верига.

Електромагнитна сила. При променлив ток силата е също сила на привличане, която зависи от квадрата на тока или на потока.

Нека величините да се изменят синусоидно във времето с кръговата честота ω :

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Тогава следва, че

$$F = \frac{\Phi^2}{2 \mu_0 s} = \frac{\Phi_m^2}{2 \mu_0 s} \sin^2 \omega t = F_m \sin^2 \omega t,$$

където

$$(3.8) \quad F_m = \frac{\Phi_m^2}{2 \mu_0 s}$$

или

$$F = \frac{F_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t.$$

Средната стойност на силата е различна от нула:

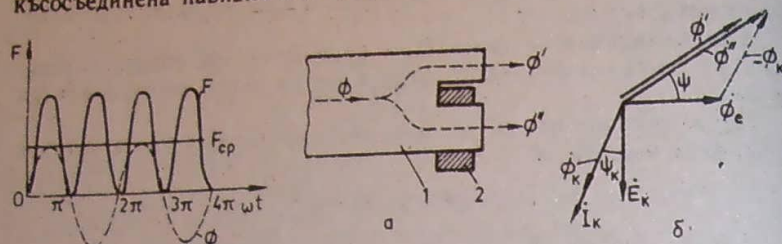
$$(3.9) \quad F_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T F dt = \frac{F_m}{2} = \frac{\Phi_m^2}{4 \mu_0 s}.$$

Следователно при променлив ток максималната стойност на силата е равна на силата при постоянен ток. Средната ѝ стойност обаче при променлив ток е два пъти по-малка от силата при постоянен ток. С увеличаване на въздушната междина при променливотоковия електромагнит намалява индуктивното му съпротивление, нарастват токът и потокът, а силата остава почти постоянна.

Изводите показват, че моментната стойност на силата пулсира с двойна мрежова честота (фиг. 3.3). Въпреки че общата сила е притегателна, нейните пулсации предизвикват вибрации на котвата и на свързаните с нея части. Това е вредно за контактната система, която след включване продължава да вибрира и да се износва.

За намаляване на вибрациите на котвата се прилагат следните мерки.

а. Поставяне на накъсосъединена навивка
Тя се използва при еднофазните електромагнити (фиг. 3.4 а).
Полюсът 1 е разцепен и върху част от него се поставя една накъсосъединена навивка във вид на медна или алуминиева ши-



Фиг. 3.3. Електромагнитна сила при променлив ток

Фиг. 3.4. Екраниран електромагнит

а — разположение на накъсосъединената навивка
б — векторна диаграма

на 2. Тя действа като електромагнитен екран за частта от полюса, върху който е поставена. Поради разцепването на полюса магнитният поток Φ се разделя на две части Φ' и Φ'' съответно през неекранираната и през екранираната част. От векторната диаграма на фиг. 3.4 б се вижда, че в накъсосъединената навивка под действието на индуктираното е. д. н. E_k протича ток I_k , който възбужда поток Φ_k , обратен на Φ'' . Трябва обаче да се знае, че E_k се индуктира не от Φ'' , а от резултантния поток Φ_e . Потоките Φ' и Φ_e се оказват дефазирани във времето на ъгъл ψ , който зависи от параметрите на накъсосъединената навивка.

Полезният ефект от дефазирането се състои в това, че пулсиращите компоненти, получени от двата потока, се сумират векторно и тяхната резултантна е по-малка.

6. Прилагане на многофазна система

Използва се при трифазните електромагнити. Силите на трите ядра на един трифазен електромагнит са дефазирани на 240° и сумата им е постоянна във времето.

$$F_A = F_m \sin^2 \omega t = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t;$$

$$F_B = F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos \left(2\omega t - \frac{4\pi}{3} \right);$$

$$F_C = F_m \sin^2 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos \left(2\omega t - \frac{8\pi}{3} \right),$$

следователно

$$(3.10) \quad F = F_A + F_B + F_C = \frac{3}{2} F_m.$$

3.3. Динамика на електромагнита

Под динамика на електромагнита се разбира поведението му по време на движението на котвата при привличане или отпускане. В динамичния режим работата на електромагнита се разглежда с отчитане на електромагнитния преходен процес След включване на намотката към напрежението токът и потокът започват да нарастват, като от един момент нататък силата става по-голяма от противодействащата сила и котвата започва да се движи. Следователно едновременно с електромагнитния преходен процес протича и електромагнитен преходен процес.

Време на задействане $t_{зад}$ на електромагнита е времето от подаване на напрежителния импулс към намотката до пълното спиране на движението на котвата. Това време се състои от време за тръгване $t_{тр}$ и време на движение $t_{дв}$.

Съвременните електромагнити имат $t_{зад} = 0,05 - 0,25$ s.

Да разгледаме задействането на един постояннотоков електромагнит, чиято намотка има съпротивление R и индуктивност L . Диференциалното уравнение на електромагнитния преходен процес е

$$(3.11) \quad U = iR + L \frac{di}{dt}.$$

решението на което е експонента:

$$(3.12) \quad i = I(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}),$$

където $I = \frac{U}{R}$ е установеният ток, U — подаденото напрежение;

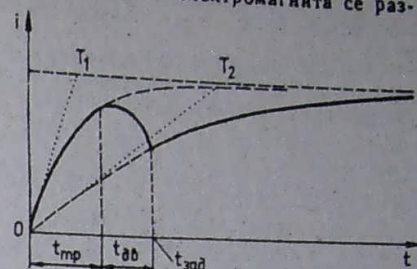
(3.13) $T_1 = \frac{L}{R}$ — електромагнитната времеконстанта на намотката при включване, която се определя от магнитната проводимост при отворена котва.

Времеконстантата е меродавна за времето на протичане на преходния процес, защото той завършва за време $t_{уст} \approx 3T_1$ (тогава $i = 0,95 I$).

Отначало котвата е неподвижна и тръгва след време $t_{тр}$ при ток $i_{тр}$. Следователно в интервала $t = 0$ до $t_{тр}$ токът се изменя по експоненциален закон с времеконстанта T_1 (фиг. 3.5) При движение на котвата въздушната междина намалява, магнитната проводимост G_m нараства, нараства и индуктивността L .

Тогава уравнението е

$$(3.14) \quad U = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}.$$



Фиг. 3.5. Изменение на тока на електромагнит през преходния процес

Членът $i \frac{dL}{dt}$ е еквивалентен на допълнително противо-е. д. н. от движението, което заедно с противо-е. д. н. на самондукцията $L \frac{di}{dt}$ и пада iR поддържа равновесие с напрежението U . В такъв случай токът започва да намалява и изменението му не е вече експоненциално. След спиране на котвата изменението на тока продължава по експоненциален закон с време-константата $T_2 > T_1$, която зависи от магнитната проводимост при затворена котва.

Поради това, че по време на движението на котвата токът не е константен и е по-малък от установения, динамичната тягова характеристика е разположена по-ниско от статичната.

3.4. Мерки за изменение на времето на задействане на електромагнитите

В много случаи за някои специални приложения е необходимо времето на задействане да се намали или да се увеличи. За целта могат да се вземат конструктивни мерки или това може да се постигне при тотов електромагнит със схемни решения.

3.4.1 Намаляване на времето на задействане

а. Конструктивни мерки

Магнитопроводът се прави шихтован от изолирани листове електротехническа стоманена ламарина. Това намалява вихровите токове в стоманените части, които се индукират по време на преходния процес от изменението на потока. Вихровите токове имат демпфериращо действие и забавят задействането на електромагнита, защото действуват като накъсосъединени контури.

Необходимо е и намаляване на хода на котвата, намаляване на нейната маса и намаляване на триенето в осите и опорите.

б. Схемни решения

Последователно на намотката на електромагнита се включва допълнително т. нар. баластен или форсиращ резистор R_d . Едновременно с това се повишава напрежението от U до U' , така че установеният ток да се запази. Тъй като общото съпротивление във веригата се увеличава, а индуктивността остава същата, време-константата се намалява.

3.4.2. Увеличаване на времето на задействане

а. Конструктивни мерки

Значително увеличаване на времето на задействане се постига чрез демпфериране. Демпферирането е електромагнитно и механично.

Електромагнитното демпфериране се постига с помощта на накъсосъединени контури, като върху магнитопровода се постави масивна медна втулка, която играе ролята на накъсосъединена навивка. Токът, който се индукира в нея при промяна на магнитния поток, има същото действие както вихровите токове в магнитопровода. Той се стреми да се противопостави на причината, която го е създала. При включване причината е нарастването на потока, а при изключване — намаляването му. Така се постига значително закъснение на задействането. Във втория случай забавящият ефект е по-силен, защото при изключване преходният процес протича при привлечена котва и индуктивността е многократно по-голяма от тази при отпусната котва. Така могат да се реализират забавяния до 10 s.

б. Схемни решения

Чрез шунтиране на намотката с диод или кондензатор се постига забавяне при изключване. Това става, защото след изключване се получава накъсосъединен контур, в който токът може да протича още известно време до нулирането му.

Електрически апарати за управление и защита

4.1. Общи сведения

Електрическите апарати, които се използват за управление и защита на електрически вериги, са предназначени за пускане, спиране и регулиране на електрически двигатели; за включване, изключване и превключване (комутиране) на различни електрически консуматори; за сигнализиране и защита от претоварване и къси съединения на електрическите мрежи, електрическите машини или други електрически уредби. Електрическите апарати се характеризират с голямо разнообразие в устройството и конструктивното си изпълнение. Те могат да бъдат класифицирани по редица признаци.

1. По начина на управление — с ръчно и с автоматично управление.

1. Според предназначението — за управление, за защита, за сигнализация и т. н.

3. По вида на тока — за постоянен и за променлив ток.

4. Според напрежението, за което е оразмерена izolацията — за ниско или за високо напрежение.

5. По големината на тока, за който е оразмерена контактната система — силови апарати и апарати за управление.

6. Според начина на комутиране — контактни и безконтактни.

Един от основните параметри на електрическите апарати е тяхната комутационна способност. Тя се изразява чрез максималния ток, който може да се комутира от апарата без опасност от повреда или разрушаването му.

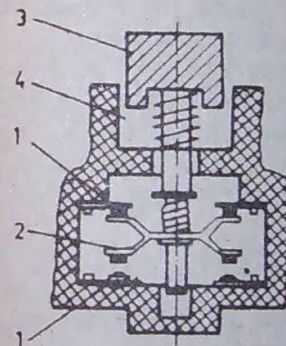
Друг важен параметър, характеризиращ контактните апарати, е износоустойчивостта на главната контактна система. Тя е електрическа и механична. Електрическата се изразява с броя на комутационните цикли, след които контактните тела са напълно ерозирали и трябва да се подменят. Механичната износоустойчивост се изразява в общия случай с броя на комутационните цикли, след които апаратът като цяло е износен и негоден за работа.

Важно значение за работата на електрическите апарати имат и други параметри, като допустима честота на комутиране, режим на работа, конструктивни особености, свързани с експлоатацията и т. н.

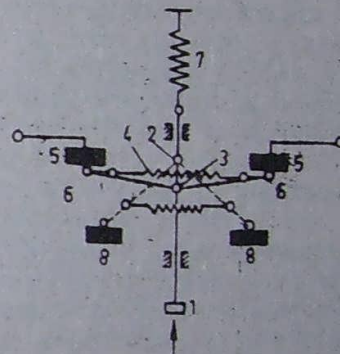
4.2. Апарати с ръчно управление

4.2.1. Командоапарати

Командоапаратите са предназначени за многократно включване или изключване на веригите за управление на силовите електрически апарати. Понякога те се използват и за непосредствено пускане на електрически машини с малка мощност, за включване на електромагнити и други съоръжения. Командоапаратите могат да се управляват ръчно — бутони, ключове, командоконтролери, или да се привеждат в действие от контролния механизъм — пътни превключватели.



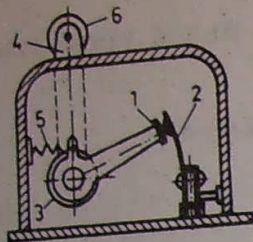
Фиг. 4.1. Бутон за управление без самозадържане



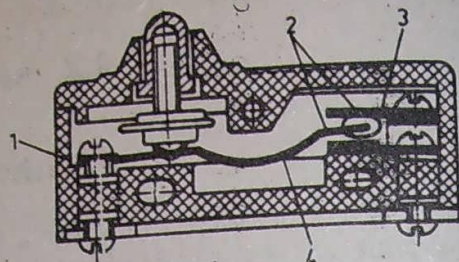
Фиг. 4.2. Бутон за управление със самозадържане

1. Бутони за управление. Това са помощни прекъсвачи, които се използват в различните схеми за пускане, спиране и реверсиране на двигателите, за включване и изключване на веригите на електромагнитите, които комутират главни вериги. На фиг. 4.1 е показано устройство на бутон за управление без самозадържане, който съдържа неподвижни контактни тела 1, подвижни 2, бутон 3, възвратна пружина 4. Бутоните се изработват за напрежение до 500 V (постоянно и променливо) и са предназначени за прекъсване на малки токове — до 6 A.

Принципната схема на действие на бутон със самозадържане е показана на фиг. 4.2. Бутонът се поддържа в нормално положение от пружината 7 (в случая са затворени неподвижните 5 и подвижните 6 контактни тела), при което възловата точка на



Фиг. 4.3. Краен прекъсвач



Фиг. 4.4. Микропрекъсвач

лостовата система се намира в долно положение 3. При натиск върху бутона 1 по посока на стрелката възловата точка започва да се премества нагоре и при положение 2 под действието на пружината 4, която се стреми да се свие и прибере лостовете, става бързо изключване; подвижните контактни тела се преместват изведнъж (с отсечка), като контактуват с неподвижните 8.

2. *Ключове и превключватели.* Ключовете имат формата и конструкцията на бутонните прекъсвачи и се използват, когато е необходимо да се включват много и разнообразни вериги — например за звукова и светлинна сигнализация и др. Изработват се за напрежение до 500 V и са предназначени за редки превключвания при работа в закрити помещения.

Превключвателите могат да имат различни секции с възможност да се включват в различни моменти от времето. Затова в каталозите обикновено се прилага диаграма за положенията на контактите на универсалните превключватели.

3. *Крайни прекъсвачи.* Краен или пътен е прекъсвачът, който извършва превключвания в главната или оперативната (управляващата) верига на дадено съоръжение: в края на пътя, изминат от работния механизъм. Този вид прекъсвачи се използва за целите на автоматичното управление на механизмите и за аварийното им изключване при напрежение до 500 V.

Крайните прекъсвачи са бутонни (действащи при натиск) и лостови.

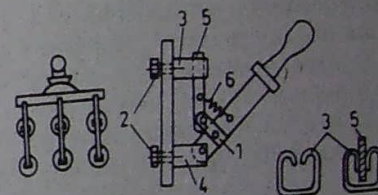
Крайните лостови прекъсвачи (фиг. 4.3) се състоят от вал 3 със закрепени върху него подвижни 1 и неподвижни контактни тела 2. Валът е свързан с лоста 4, в края на който има ролка 6. Когато механизмът достигне крайно положение, някаква част натиска ролката на лоста и го придвижва наляво, при което контактните тела 1 и 2 се разделят и прекъсват веригата. След премахване на въздействието лостът се връща в изходно положение под

действието на възвратната пружина 5. Тези прекъсвачи се използват както в оперативни, така и в главни вериги на съоръженията. Конструкциите им са много и разнообразни.

В случаите, когато е необходимо да бъде спряна дадена машина с голяма точност, се използват т. нар. микропрекъсвачи с фиг. 4.4. Неподвижните контактни тела 2 са закрепени в пластмасово тяло 1. Подвижното контактнo тяло 3 е закрепено в края на пружината 4, която е със специална U-образна форма. При на определен ход изменя рязко формата си, като се затваря долният контакт, а се отваря горният. Преминването от едно състояние в другото става много бързо (с отсечка). Действието на микропрекъсвачите не се различава по принцип от действието на бутонните крайни прекъсвачи, обаче те са пригодени за реагиране на много малки премествания, откъдето произлиза и наименованието им.

4.2.2. Ножови прекъсвачи

Това са комутационни апарати с ръчно задвижване, предназначени за редки включения и изключения на електрически консуматори. Те са най-простите апарати, използвани в мрежите с напрежение до 600 V и ток до 100 A. Ножовите прекъсвачи, които се използват за прекъсване на по-голям ток, се снабдяват с дъгогасителни камери. Общият вид на ножов прекъсвач, предназначен за монтиране върху табло,



Фиг. 4.5. Ножов прекъсвач

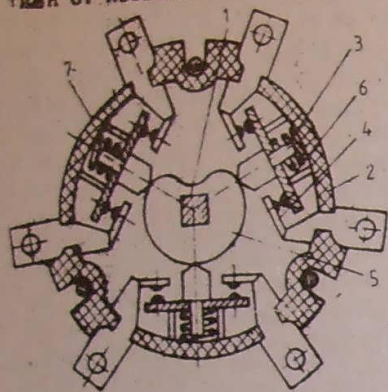
е показан на фиг. 4.5. Той има подвижни контактни тела — ножове 5, и неподвижни — челюсти 3. Подвижните контактни тела са закрепени шарнирно върху лостовете 1 и свързани с пружините за бързо изключване 6. С 4 са отбелязани ножодържателите, а с 2 — изводните клеми. Лостовите прекъсвачи могат да бъдат едно-, дву-, три- и повече полюсни.

4.2.3. Пакетни прекъсвачи

Това са многопозиционни апарати с въртливо задействане, предназначени за редки превключвания във вериги с ниско напрежение. Пакетните прекъсвачи могат да

бъдат едно-, дву-, три- и многополюсни. Обикновено са от гърби-
чен (ексцентриков) тип — фиг. 4.6.

Конструктивно те се състоят от комплект ексцентрикови пластини от изоляционен материал 5, които са закрепени върху подвижен вал 1. Подвижните контакти от мостов тип 6 се поставят върху радиално разположени контактодържатели 3 и контактни пружини 7, а неподвижните 4 — между тях, като са фиксирани към тялото 2. Ексцентриковите пластини могат да бъдат разположени така, че да е възможно едновременно превключване на няколко вериги в определена последователност.



Фиг. 4.6 Пакетен прекъсвач

4.2.4. Разединители

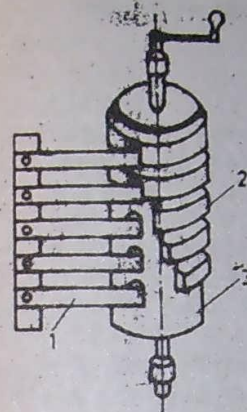
Разединителите са прекъсвачи, с които се разделят видимо части от електрическата мрежа, между които не бива да има електрическа връзка. Разединителите не се оразмеряват за прекъсване на веригите под товар, поради което включването на разединителя трябва да става преди включването на последователно свързания с него прекъсвач, а изключването — след изключването на прекъсвача. При ниски напрежения и малки токове обаче разединителите са в състояние да включват и да изключват електрически ток. Тогава те се наричат прекъсвачи, но са с малка комутационна способност.

4.2.5. Контролери

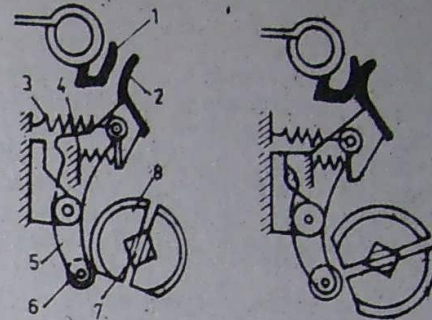
Контролерът е многопозиционен прекъсвач с ръчно управление, който служи за превключване под товар във веригите на електрическите машини при спазване на строго определена последователност на превключване. Следователно той може да бъде разглеждан като съвкупност от прекъсвачи, свързани механично помежду си. Контролерът има предимство пред другите ръчни прекъсвачи, тъй като изискваната последователност на превключване се осъществява просто и сигурно. Контролерите с резистори се използват за пускане на двигателите със средна мощност.

Според конструкцията си контролерите се делят на барабани, ексцентрикови (гърбични) и плоски.

Барабанните контролери (фиг. 4.7) се състоят от неподвижни контактни тела 1, закрепени на изолирана щанга чрез пластинчати контактни пружини, и барабан 3, върху който във вид на изолирани сегменти са разположени подвижните контактни тела



Фиг. 4.7. Барабанен контролер



Фиг. 4.8. Ексцентриков контролер

2. При въртене на барабана в зависимост от разположението на подвижните контактни тела върху него различните контактни двойки се затварят в определена последователност и могат да бъдат включени с различна продължителност.

На фиг. 4.8 е показано действието на ексцентриков контролер. От нея се вижда процесът на затваряне на една двойка контактни тела (неподвижно 1, подвижно 2). Движението на подвижното контактно тяло се осъществява от ексцентрика 8, разположен върху вала 7, и пружините 3 и 4. Останалите елементи са ролката 6, която се търкаля по ексцентрика и облекчава движението на системата, и лостът 5, чрез който се предава движението на вала по подвижното контактно тяло. Когато ролката 4 се търкаля по дъгата на гърбицата 8, контактите са отворени, но щом попадне в изреза ѝ, подвижното контактно тяло се приближава под действието на пружините до неподвижното и веригата се затваря. Тази конструкция позволява да се монтират върху вала голям брой ексцентрици с различно разположение и съответни контактни системи. Контролерите се изработват за голям брой включвания в час, защото контактната им система има по-голяма износостойчивост.

При плоските контролери неподвижните контакти са разположени в една равнина, а подвижните се плъзгат върху тях.

4.3. Апарати с автоматично управление

4.3.1. Контактори — общи сведения

Контакторът е двупозиционен комутационен апарат с *автоматично задействане*, предназначен за чести включвания и изключвания на електрически вериги под товар. Контакторите се управляват дистанционно. Задвижването им се осъществява чрез електромагнит, според вида на който те са постояннотокови и променливотокови.

Контакторите за постоянен ток са предназначени да комутират постояннотокови вериги и имат електромагнит за постоянен ток.

Контакторите за променлив ток комутират променливотокови вериги. Техният електромагнит обикновено е за променлив ток, но в някои случаи може да бъде за постоянен ток.

Във връзка с повишената производителност на труда електрифицираните задвижвания изискват до 1200 и повече включвания в час. Такъв режим на работа е много тежък за контакторите и е свързан с износване на контактните тела. Поради това се вземат мерки, които водят до сигурно изгасяване на електрическата дъга при изключване. Голямата честота на включване изисква голяма механична устойчивост на електромагнитния механизъм на контактора. Ето защо контакторите трябва да имат голяма износоустойчивост (както механична, така и електрическа).

Контакторът има следните основни възли: главна контактна система, дъгогасителна система, електромагнитна система и помощна контактна система.

При подаване на напрежение към намотката на електромагнита в него се възбужда магнитно поле и се привлича подвижната му част (котвата). Подвижните контактни тела, свързани с котвата, включват или изключват веригата. Дъгогасителната система осигурява бързо гасене на дъгата, което спомага за намаляване на износването на контактните тела. Освен главната контактна система контакторът има и помощна маломощна контактна система (блок-контакти) за съгласуване на работата му с други апарати.

4.3.2. Контактори за постоянен ток

На фиг. 4.9 е показан схематично двуполусен контактор за постоянен ток. Постояннотоковите контактори се произвеждат в голямо разнообразие по номинален ток, напрежение, брой на контактните двойки и конструктивно изпълнение. Те са предназначени за управление на постояннотокови двигатели, в промишлеността, в съобщенията и за управление на постояннотокови консуматори при различно напрежение.

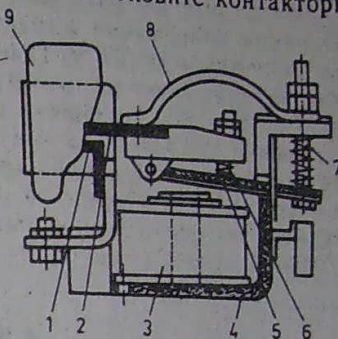
Основен параметър, който определя габаритите на контактора, е неговият номинален ток, за който е оразмерена главната му контактна система и при който е гарантирана нейната електрическа износоустойчивост.

Контактна система. Тя се състои от подвижно контактнo тяло 2 и неподвижно 1. Контактните тела на апарата са подложени на силно електрическо и механично износване поради големия брой включвания и тежките условия на работа. За осигуряване на малко преходно контактнo съпротивление контактната пружина 6 създава необходимата контактна сила. Пружината 7 служи за изключване на контактора и се нарича възвратна. Тя трябва да осигурява голяма скорост на изключване, за да може възможно най-бързо да се изгаси дъгата, която се поражда между контактните тела.

Дъгогасителна система. За бързото гасене на дъгата се предвижда дъгогасителна камера 9. Целта на камерата е да локализира дъгата в определено пространство и да предотврати прехвърлянето ѝ между съседните полюси на контактора.

В контакторите за постоянен ток се предвижда обикновено гасене на дъгата с магнитно поле. За целта в дъгогасителните камери се вграждат постоянни магнити.

Електромагнитна система. Тя се състои от електромагнит 3, чийто магнитопровод 4 служи и за закрепване на редица детайли. Подвижната част — котвата 5 на електромагнита, се привежда в действие от електромагнитната сила на привличане, която електромагнитът създава при подаване на напрежение, и от пружината 7, когато то се прекъсне. Към котвата на електромагнита са закрепени подвижното контактнo тяло 2 и тоководещият елемент 8, който в повечето случаи е гъвкав меден проводник.



Фиг. 4.9. Принципна конструктивна схема на контактор за постоянен ток

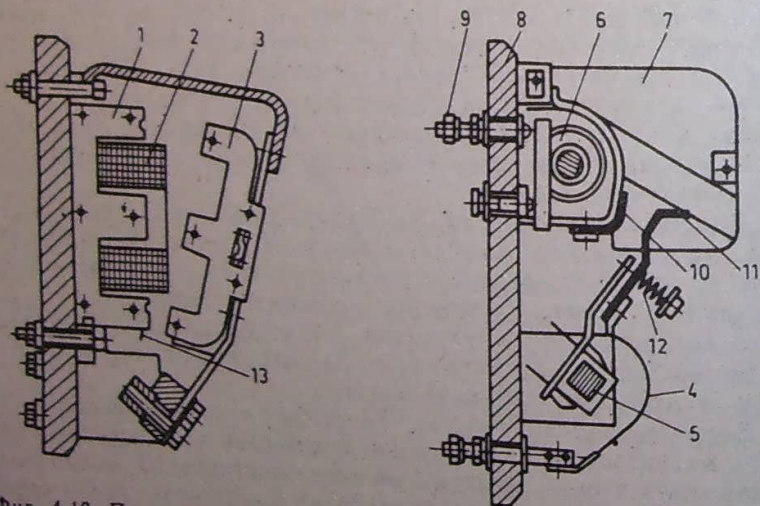
Помощната контактна система (блок-контактите) не е показана на фигурата. Тя е свързана с главната контактна система и при включването или при изключването ѝ включва или изключва веригите на други апарати.

Намотките на електромагнитите се предвиждат обикновено за ниски напрежения в границите 24—80 V, но могат да бъдат и за напрежение до 500 V. Напреженията на силовите вериги, които контакторът може да прекъсва, са също различни. В зависимост от тях е и конструкцията на дъгогасителната система.

Важен показател за контакторите е времето за включване и за изключване. Например времето за включване на контакторите е около 0,1 s, а времето за изключване — около 0,05 s. Този показател определя дали контакторът е бързодействащ или не — условие, важно за системите на задвижване и регулиране.

4.3.3. Контактори за променлив ток

Контакторите за променлив ток служат за същите цели, както и контакторите за постоянен ток, и се състоят практически от същите възли. На фиг. 4.10 е показано принципно устройство на променливотоков контактор.



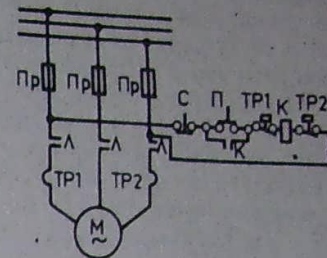
Фиг. 4.10. Принципно конструктивна схема на контактор за променлив ток

На фигурата е показан електромагнитът на контактора и контактната система за един полюс. Електромагнитът 1 след включване на намотката му 2 към напрежение привлича котвата 3. Тя е свързана с вала 5 на контактора и чрез него с контактната

система, чиито контактни тела 10 и 11 се намират в дъгогасителната камера 7. Заедно с главните контактни тела се задвижват тела — неподвижно 10 и подвижно 11, контактната пружина 12, гъвкавият проводник 4, намотката за магнитно гасене на дъгата 6, основата на контактора 8 и изводите 9.

Променливотоковите контактори са подобни на контакторите за постоянен ток, но имат някои особености.

Характерно за намотката на електромагнита на променливотоковия контактор е, че освен активно тя има и индуктивно съпротивление, като обикновено $X_L \gg R$. Поради това броят на навивките в намотките на



Фиг. 4.11. Схема за включване на асинхронен двигател

променливотоковите контактори е много по-малък от броя на постояннотоковите (приблизително 10 пъти) при еднаква стойност на напрежението. Поради това тяхното активно съпротивление е малко и загубите в намотката — също. Намотката на електромагнита на контактора за променлив ток се загрява допълнително от загубите на енергия, които променливият магнитен поток създава в магнитопровода. Ето защо формата им е такава, че контактът с магнитопровода е малък — те са плоски (с малка височина) и широки.

Магнитната система на променливотоковите контактори се прави като пакет от листов стомана заради загубите на мощност в нея, а при постояннотоковите — от плътен материал. Магнитните системи са соленоидни, П-образни и Ш-образни (които са разпространени най-много). За разлика от постояннотоковите контактори магнитопроводът на променливотоковите има на късосъединена навивка 13, поставена за намаляване на вибрациите на котвата.

Времето за включване и изключване на двата вида контактори се различава значително. Както времето за включване, така и времето за изключване на контакторите за променлив ток са 2—3 пъти по-малки от съответните времена при постояннотоковите контактори.

На фиг. 4.11 е показана схема за включване на трифазен асинхронен двигател с контактор. Главните (линейните) контактни тела Л на триполюсния контактор се включват във веригата на двигателя, а намотката му К — в оперативната верига, включена към линейното напрежение. Във веригата на двигателя се включват и нагревателните елементи на електротоплинните реле ТР1 и ТР2. В оперативната верига са включени още бутоните за пускане П и спиране С и контактите на топлинните ре-

лета $TP1$ и $TP2$. Паралелно на бутона P се включва един от блок-контактите K на контактора. Преди пускане са отворени контактните тела на бутона P , блок-контактът на оперативната верига K и главната контактна система на контактора. При натискане на бутона P протича ток през намотката на контактора K и се затварят контактните двойки L и K . Двигателят получава напрежение и се развърта. След отпускане на бутона P оперативната верига не се прекъсва, защото е свързана през блок-контакта K . Спирането става, като се натисне бутонът C или ако след задействане на едно от топлинните релета се отвори съответният контакт $TP1$ или $TP2$. Тогава веригата се прекъсва и електромагнитът на контактора отваря главните контактни тела L . Самопускане не може да стане, защото е необходимо да се натисне бутонът P .

4.4. Апарати за защита и сигнализация

4.4.1. Стопяеми предпазители

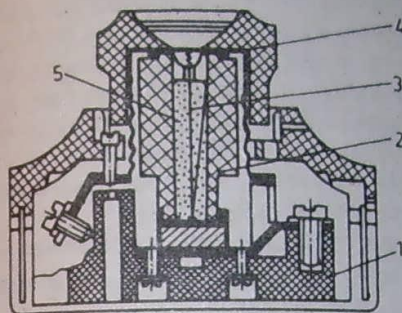
Предпазители са комутационни апарати, които защитават уредбите за ниско напрежение от сравнително големи продължителни претоварвания и от токове на късо съединение.

Основна част на предпазителя е *стопяемата вложка*, която представлява проводник или лента от мед, цинк или друг леснотопим метал. През предпазителя преминава токът, който тече към консуматора. При големи стойности на този ток топлината, отделяна във вложката, предизвиква нейното силно загряване и стапяне (изгаряне). В резултат на това веригата се прекъсва. От начина на действие на тези предпазители произлиза и наименованието им — предпазители със стопяема вложка или стопяеми предпазители.

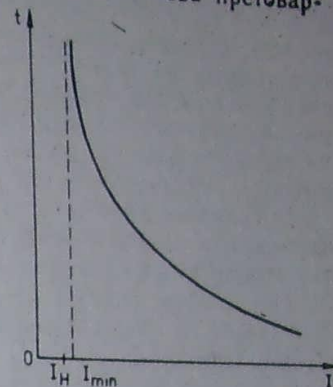
Предпазители, които се използват най-често, са маломощни — за токове до 6 А, обикновени (винтови) — за токове до 100 А, и високомощни — до 1000 А. Обикновените предпазители (фиг. 4.12) се състоят от гнездо 1 , в което се поставя патрон 2 със стопяема вложка 3 . Патронът се напълва с кварцов пясък 5 за по-бързо изгасяване на електрическата дъга, която се образува при изгарянето. Патронът се притиска с винтова капачка 4 , която дава възможност да се присъединят съответните контактни повърхности към изводните клеми. Високомощните предпазители се състоят от изолационна тръба, запълнена с кварцов пясък, в която се поставя стопяема вложка, закрепена към контактните

челюсти. Предпазителят се свързва с другите елементи на веригата чрез ножови контактни тела.

Времето t от момента, в който настъпва претоварването, до прекъсването на веригата зависи от степента на това претовар-



Фиг. 4.12. Обикновен стопяем предпазител



Фиг. 4.13. Времетокова характеристика на стопяем предпазител

ване. Стопяването на вложката настъпва толкова по-бързо, колкото токът на претоварването е по-голям. Зависимостта на времето за изключване (времето за стопяване на вложката плюс времето за горене на дъгата) от тока се нарича *времетокова характеристика* на предпазителя. Тя има вид на квадратична хипербола и е показана на фиг. 4.13. От нея се вижда, че съществуват токове, при които вложката на предпазителя няма да се стопи. Минималният ток, при който вложката се стопява, се приема

$$I_{\min} = (1,2 \div 1,4) I_n$$

където I_n е номиналният ток на предпазителя. Това показва, че предпазители със стопяема вложка не могат да защитават дадена верига от малки по стойност, но продължителни претоварвания.

Времетоковата характеристика на предпазители се използва за тяхното правилно избиране. Те трябва да отговарят на следните условия: да не прекъсват веригата при кратковременните претоварвания при пускане на системите и да изключват сравнително бързо при големи претоварвания, за да се избегнат повреди и пожари в съоръженията.

4.4.2 Автоматични въздушни прекъсвачи

Автоматичният въздушен прекъсвач е комутационен апарат с ръчно включване и ръчно или автоматично изключване на вериги за ниско напрежение при възникване на недопустими претоварвания и токове на късо съединение в тях, голямо понижение на напрежението, изменение на посоката на мощността и т. н. Автоматичните прекъсвачи се използват за редки включения и изключения при номинални условия. Към тях се предявяват следните изисквания:

1. Токовата верига на прекъсвача трябва да пропуска номинални ток продължително време. Режимът на продължително включване е нормален за автоматичния прекъсвач.

2. Прекъсвачът трябва да осигури многократно изключване на тсковете на късо съединение, които могат да достигнат твърде големи стойности.

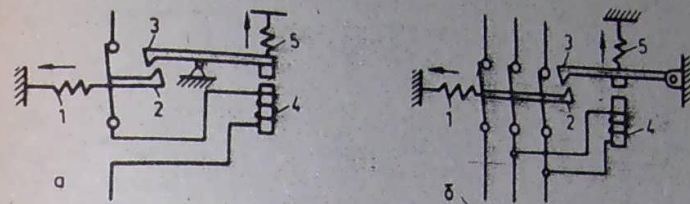
3. Прекъсвачът трябва да има малко собствено време на задействие. Собствено време на прекъсвача се нарича времето от момента, в който настъпят условията за задействие (голям ток, ниско напрежение и др.), до момента, в който контактните тела започват да се отделят под действие на изключвателното устройство. Според собственото време на задействие автоматичните прекъсвачи се делят на нормални и бързодействащи.

Според величините, на които реагират изключвателните устройства, автоматичните прекъсвачи се разделят на: 1) прекъсвачи на максимален ток; 2) прекъсвачи за минимален ток; 3) прекъсвачи за минимално напрежение; 4) прекъсвачи за обратна мощност.

1. Прекъсвачи за максимален ток. Те прекъсват веригата, ако токът в нея достигне стойност, превишаваща зададената. От фиг. 4.14 а се вижда, че при ток, по-голям от тока, за който апаратът е настроен, електромагнитът 4 преодолява силата на пружината 5 и привлича лоста 3. Той освобождава от зацепването лоста 2 и прекъсвачът се изключва под действието на пружината 1. Като се регулира силата на пружината, може да се регулира токът на задействие в границите $(1-2)I_n$. Времето за изключване на бързодействащите прекъсвачи е много малко, поради което, ако веригата, в която е включен прекъсвачът, има кратко-временно претоварване, той ще я прекъсне. За да не стане това, някои прекъсвачи се изработват с максималнотокова защита със закъснение.

2. Прекъсвачи за минимално напрежение. Те изключват веригата, ако напрежението в мрежата стане по-ниско от определена стойност. В такъв случай (фиг. 4.14 б) електромагнитът 4 изгубва възможността си да поддържа равновесие с пружината

5, нарушава се зацепването на лоста 2 и прекъсвачът се изключва под действие на пружината 1. Обикновено всеки прекъсвач има дъгогасително устройство, което спомага за най-бързото изгасяване на електрическата дъга, възникнала при прекъсването на веригата.



Фиг. 4.14. Принципи схеми на автоматични прекъсвачи

Разглежданите прекъсвачи се наричат въздушни, защото средата, в която става гасенето на дъгата, е въздух. В прекъсвачите има контактна система, която може да се състои от няколко вида основни, помощни и дъгогасителни контактни тела. Освен това в прекъсвача се разполагат елементите за защита (в случая максималнотокова), механизмът за управление, изключвателният механизъм и пр.

Автоматичните въздушни прекъсвачи се изработват в повечето случаи комбинирани с различни защиты — например с максимална по ток и с минимална по напрежение, с максимална по ток и със защита за обратна мощност, с термична защита и др.

Основни параметри на прекъсвачите са номинален продължителен ток, номинално напрежение, максимален ток на изключване, собствено време на изключване, времетокова характеристика (която е подобна на тази на предпазителите).

4.4.3. Релета

1. *Общи сведения.* Релето е двупозиционно устройство с дискретно (прекъснато) действие, което има две устойчиви състояния — включено и изключено (1 и 0). Типичен пример е обикновеното контактно електромагнитно реле, което има две устойчиви състояния на входа — наличие или липса на електрически сигнал, и две на изхода — затворена или отворена контактна система. Характерно за релето е, че когато входната (управляващата) величина достигне определена стойност, изходната (управляваната) се изменя скокообразно (с отсечка).

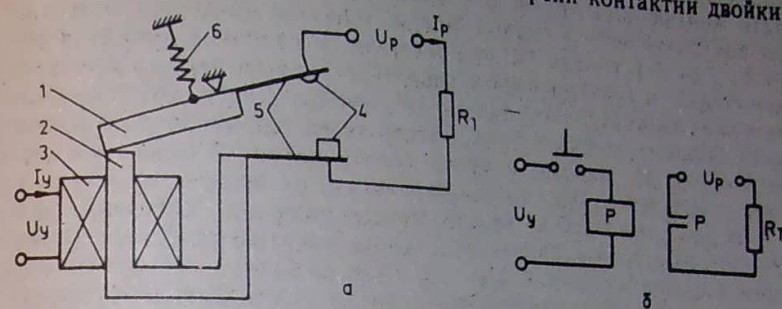
Най-важната зависимост, характеризира едно реле, е неговата характеристика вход—изход. При идеално реле тя трябва да има вида на единична функция (фиг. 4.15 а). Реалната релейна характеристика е показана на фиг. 4.15 б и в. Както се

или зона на нечувствителност. Пълният релеен цикъл в общия вид от фиг. 4.15 в е характерен за безконтактните релета, докато за контактните $y_{\min} = 0$ и тяхната характеристика е показана на фиг. 4.15 б. Понеже входната и изходната величина за електрическите релета обикновено е ток или напрежение, то $y = I_p$ (токът в работната верига, т. е. през контактната система на релето), а $x = I_y$ (токът в управляващата верига, т. е. в намотката на релето).

Според принципа на действие електрическите релета са електромагнитни (електромеханични), електротоплинни (термични), електронни, магнитни и др. Релетата могат да бъдат още хидравлични, пневматични, центробежни, фоторелета и т. н. Електромагнитите и електротоплинните релета са контактни релета, а електронните и магнитните — безконтактни. Според областта на приложение има релета за автоматиката, за управление, защита и сигнализация на електропродвижванията и за релейна защита на енергийните системи.

2. Електромагнитни токови и напрежителни релета. Електромагнитното реле представлява електромагнит, захранван с постоянен или променлив ток.

ната схема на едно електромагнитно постоянноково реле от класен тип. Неговите основни елементи са котва 1, магнитопровод 2 от нисковъглеродна стомана, намотка 3, контактна система от нормално отворени или нормално затворени контактни двойки



4, контактна пружина (или контактни пера) 5, възвратна пружина 6. Върху долната част на котвата обикновено се поставя подложка от неферромагнитен материал, за да се избягва „залепването“ на котвата поради остатъчния магнитен поток. Различieto на релетата от контакторите се състои в значително облекчената контактна система и в това, че работните контактни тела могат да бъдат повечe (когато едните се затварят, другите се отварят).

Основен показател за определяне на характеристикните параметри на електромагнитните релета е съотношението между т. нар. електрическа и механична тягова характеристика. Електрическата характеристика (фиг. 4.17) е зависимостта между електромагнитната сила F_e от големината на въздушната междина δ между котвата и ядрото. Тук $F_{e1} = f(\delta)$ е характеристиката при сигнал за задействувание, а $F_{e2} = f(\delta)$ — при сигнал за отпускане. Механичната характеристика представлява зависимостта между

противодействащата сила F_m на пружините от въздушната междина δ . Силата F_m е сума от действието на две пружини, като F_1 е силата на възвратната пружина, а F_2 — на контактната. Тъй като контактната пружина е оразмерена да действа по време на контактуването и малко преди това (за въздушна междина от $\delta_{\min}$ до δ_1), силата F_m се представя с начупена линия. И механичната, и електрическата характеристика са падащи при увеличаване на въздушната междина δ , защото силата, която пружините създават, е най-голяма, когато те са най-силно притиснати (най-малка δ). Силата, с която електромагнитът привлича котвата, също намалява с отдалечаването ѝ от него.

За да се задействува релето, необходимо е при каквато и да е въздушна междина силата F_{e1} , която електромагнитът създава при подаване на тока $I_{y \text{ зад}}$, да бъде по-голяма от силата F_m , с която пружините противодействуват. За да бъде сигурно задействуването, към намотката се подава ток I_y , по-голям от $I_{y \text{ зад}}$. Коефициентът на запаса за постояннотоковите електромагнити е $k_3 \approx 1.4$.

Минималната въздушна междина $\delta_{\min}$, която е означена на фигурата, е дебелината на немагнитния материал или въздуха, необходими за избягване на залепването.

За да може електромагнитът да отпусне котвата, трябва силата F_{e2} при ток $I_{y \text{ отп}}$ да бъде по-малка от F_m . В този случай пружините отблъскват подвижната част. Коефициентът на възвръщане k_4 да бъде колкото може по-близък до единица за правилната настройка и опростяване на схемите за управление. За да се приближи k_4 до единица, необходимо е електрическата и механичната характеристика на релетата да бъдат близки по форма.

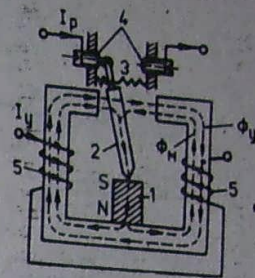
Коефициентът на възвръщане на електромагнитните релета е около 0,7. Това показва, че разликата между управляващия ток, при който релетата се задействуват, и тока, при който става отпускането, е значителна.

Постояннотоковите електромагнитни релета за напрежение имат много конструктивни разновидности и голям диапазон на напрежение — от 24 до 500 V. Токовете релета се изработват за номинални токове от 1,5 до 150 A. Консумираната от двата вида релета мощност е от 10 до 20 W.

Електромагнитните релета за променлив ток имат редица недостатъци в сравнение с тези за постоянен ток: вибрации на котвата, по-малка сила на привличане на електромагнита, необходимост от шихтоване на магнитопровода, по-голяма цена. Релетата за променлив ток, както и контакторите имат малък брой навивки от проводник с голямо сечение. В системите за автоматично регулиране те се използват като максималнотоклови, минимално — и максималнонапреженови, за управление и сигнализация. Тези релета също имат много конструктивни разновидности и

голям диапазон на токове и напрежения. Консумираната мощност при тях е значителна — няколко десетки волтампери. Освен клапанен тип електромагнитните релета могат да бъдат и с Г- или П-образна котва, например телефонните релета, релетата с въртяща се котва, стъпковите избирачи, соленоидните релета и др.

3. *Поляризиращи релета.* Поляризиращото реле се различава от обикновеното електромагнитно реле по това, че в неговата магнитна система има *постоянен магнит*. Магнитният поток, създаден от намотката, се прибавя или изважда от магнитния поток на постоянния магнит в зависимост от посоката на тока, който тече през нея. Релето се нарича поляризирано, защото неговото задействуване зависи от поляритета на тока в намотката му.



Фиг. 4.18. Поляризиращо реле

Поляризиращото реле от фиг. 4.18 се състои от постоянен магнит 1, върху полюсите на който се поставя котвата 2, която се придържа от пружини 3 в неутрално положение спрямо контактните тела 4. Ако липсват тези пружини, котвата няма да има неутрално положение — в зависимост от посоката на силата тя ще бъде привлечена към единия или към другия полюс. Във втория случай релето е двупозиционно, а в първия — трипозиционно. Намотката 5 е разположена върху бедрата на магнитопровода.

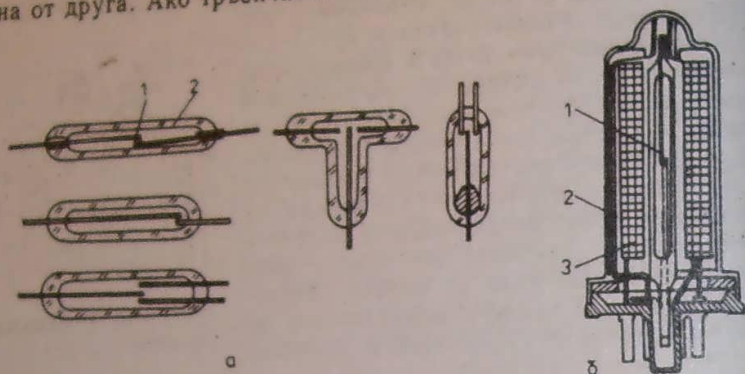
Докато през намотката не преминава ток, силата на привличане на котвата от двата полюса е еднаква. При протичането на ток с дадена посока намотката създава магнитен поток, който се прибавя или изважда от магнитния поток на постоянния магнит. В резултат на това електромагнитната сила става по-голяма откъм страната на този полюс, където потоците се сумират, и котвата се привлича. Релето се поляризира. При смяна на посоката на тока в намотката силата променя знака си.

Поляризиращите релета са по-чувствителни от обикновените — нуждаят се от по-малък управляващ ток. По-голямата им чувствителност се дължи на това, че магнитният поток на намотката взаимодейства с този на постоянния магнит и котвата попада под действието на сила, определена от разликата между силите на привличане на двата полюса.

4. *Херметични релета.* Известни са под наименованието херкони (херметични контакти), херконови контакти, рид-контакти, рид-релета, рид-ампули, управляеми контакти, контактрони и др. Те представляват две тънки феромагнитни пластинки 1 от пермалой, запоеени в стъклена тръбичка (ампула) 2 — фиг. 4.19 а. Пластинките изпълняват едновременно ролята на магни-

топровод, контактни пружини и контактни тела. Тръбичката е запълнена с азот или някакъв друг инертен газ.

При нормално състояние пластинките са малко раздалечени една от друга. Ако тръбичката се помести в магнитно поле, сило-



Фиг. 4.19. Херметични релета

а — управлявани от постоянен магнит; б — управлявани от намотка

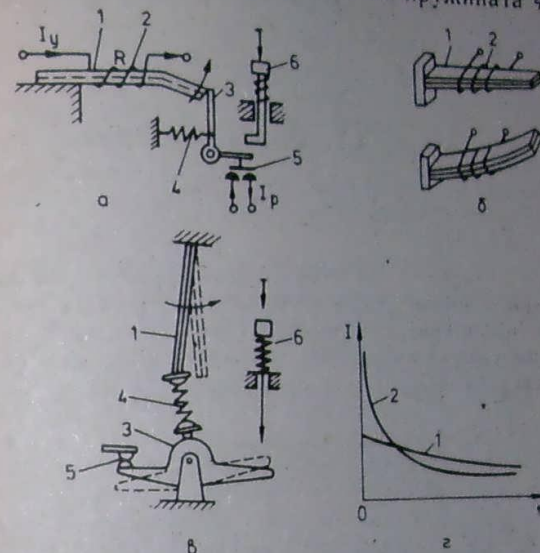
вите линии на което са надлъжни на пластинките, последните се доближават една до друга и осъществяват контакта — релето се задействува. Магнитното поле, което управлява херкона, се получава от соленоид (намотка) 3, в който се поставя херконът — фиг. 4.19 б. Възможно е управлението на херкона и от постоянен магнит, минаващ покрай него или доближаващ се до него. Ако се управлява от електромагнит с правоъгълен хистерезисен цикъл, херконът се нарича *ф е р и д*.

Херконите са маломощни и миниатюрни релета с размери от няколко милиметра до няколко сантиметра. Те се комплектуют към интегралните схеми, където комутиращият ток е от порядъка на милиамперметри, а напреженията — няколко волта. Произвеждат се за токове до няколко ампера и за напрежение до 500 V.

5. Електротоплинни релета. Електротоплинните релета (терморелета) са наречени така, защото принципът на работата им се базира върху изменението на формата или размерите на някои от техните органи под действието на топлината при нагриването им с електрически ток. Като елементи, които се деформират значително под действието на топлината, широко разпространение са получили биметалите. Биметалът представлява пластина от два метала със силно различаващи се коефициенти на линейно разширение. В такъв случай при загряване поради различното им удължаване биметалът се изкривява.

На фиг. 4.20 е показано принципното устройство на едно елек-

тротоплинно реле. То се състои от биметална пластина 1 и нагревателен елемент 2, през които преминава токът за консуматора. При определено загряване биметалът се изкривява нагоре и отпуска лостчето 3, което под действието на пружината 4 се наклон-



Фиг. 4.20. Електротоплинно реле

а — устройство; б — принцип на действие; в — реле с отсечка; г — времетокова характеристика на топлинно реле 1 и на предпазител със стопяема вложка 2

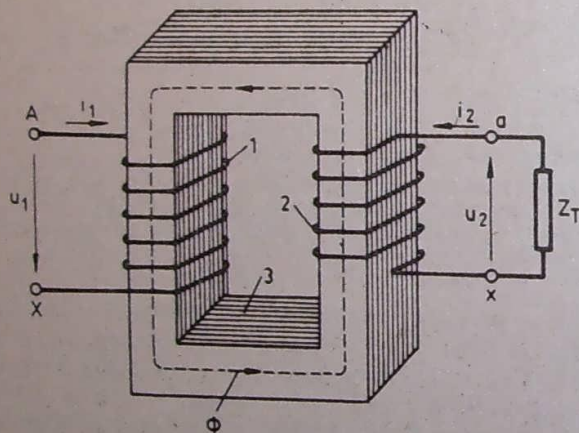
нява наляво и отговаря контактната система 5. След изстиването релето може да бъде върнато в изходно положение чрез натискане на бутона 6. Съществуват релета, при които възстановяването на изходното положение става автоматично.

Топлинните релета се използват широко в контакторите и прекъсвачите за защита на двигатели за ниско напрежение от претоварване. Те не са подходящи за защита от къси съединения, тъй като топлинното реле не изключва веднага (необходимо е време, за да се загрее и деформира биметалът). Като се има предвид, че ударният ток на късо съединение трае много кратко време, следва, че за защита от него двигателят трябва да бъде снабден с предпазители. В схемите за защита се използват и двата елемента, защото предпазителят не може да осигури изключване при малки, но продължителни претоварвания, а тази задача се изпълнява от топлинното реле.

5 Трансформатори

5.1. Общи сведения

Предназначение. Трансформаторът е статично електромагнитно устройство, което служи за преобразуване на една (първична) променливотокова система в друга (вторична). В общ случай вторичната променливотокова система може да се отличава от първичната по някои параметри: стойност на



Фиг. 5.1. Принципно устройство на еднофазен дву-намотъчен трансформатор

напрежението и тока, брой на фазите, честота, форма на кривата на напрежението (тока). Най-често трансформаторът служи за преобразуване на променлив ток с едно напрежение в променлив ток с друго напрежение. При това броят на фазите, честотата и формата на кривата на напрежението и тока остават непроменени.

Принципно устройство. Най-простият трансформатор (фиг. 5.1) се състои от първична намотка 1, към която се подава променливотокова енергия от захранващата мрежа, и

вторична намотка 2, от която променливотоковата енергия се подава на товара с импеданс Z_T . За усилване на електромагнитната връзка между намотките обикновено те се разполагат на феромагнитен магнитопровод 3. При честоти до 150 Hz магнитопроводът се изработва от листова електротехническа стомана с дебелина 0,35—0,50 mm. При по-високи честоти се използва по-тънка листова стомана. При честоти над 1 kHz се използват феритни магнитопроводи, които се изработват чрез пресоване. При честоти над 100 kHz се използват трансформатори без феромагнитен магнитопровод (въздушни трансформатори).

Величините, които се отнасят за първичната намотка, се означават с индекс 1, а величините, които се отнасят за вторичната намотка — с индекс 2.

Принцип на действие. При включване на първичната намотка на трансформатора (фиг. 5.1) към мрежа със синусоидно напрежение u_1 , през намотката преминава ток i_1 , който възбужда магнитен поток Φ , затварящ се през магнитопровода (при пренебрегване на незначителните потоци на разсейване). Потокът се изменя синусоидно във времето и индуктира е. д. н. както в първичната, така и във вторичната намотка. При включване на товар към вторичната намотка през нея ще преминава ток i_2 и на изводите ѝ ще се установи напрежение u_2 . Резултантният поток в магнитопровода вече се създава от токовете в двете намотки.

Нека w_1 и w_2 са броят на навивките на двете намотки, а E_1 и E_2 — индуктираните в тях е. д. н. Понеже двете намотки обхващат един и същ магнитен поток, във всяка навивка на вторичната намотка ще се индуктира същото е. д. н., както и във всяка навивка на първичната. В такъв случай е. д. н. на двете намотки ще се отнасят едно спрямо друго както броят на навивките им, т. е.

(5.1)

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k$$

където k е коефициентът на трансформация.

Ако се пренебрегнат падовете на напрежение в намотките, които не превишават няколко процента от номиналните стойности на напреженията, то $E_1 \approx U_1$, $E_2 \approx U_2$ и

(5.2)

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} = k$$

Вижда се, че чрез подходящ подбор на броя на навивките на намотките може да се получи желаното съотношение на напреженията.

Ако се пренебрегнат загубите в намотките и магнитопровода

на трансформатора и се приеме, че коефициентите на мощността $\cos_1$ и $\cos_2$ са равни, може да се запише

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2,$$

откъдето

(5.3)

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k}.$$

Следователно токовете се изменят обратнопропорционално на напреженията.

Видове трансформатори и области на приложение. Трансформаторите може да се класифицират по няколко признака:

1) според броя на фазите — еднофазни и многофазни (най-често трифазни);

2) според броя на намотките за фаза — двунамотъчни и многонамотъчни;

3) според отношението на напреженията — повишаващи и понижавачи;

4) според вида на охлаждането — с въздушно охлаждане (сухи трансформатори) и с маслено охлаждане (маслени трансформатори);

5) според предназначението — силови и специални.

Силовите трансформатори се използват за трансформиране на електрическа енергия в електрическите мрежи. Имат най-различни мощности и напрежения, като достигат мощност няколко хиляди kVA и напрежение до 500 kV.

Различни видове специални трансформатори се използват за токоизправители, за електрически пещи, за електрозаварка, за измерване на ток и напрежение и др.

Към специалните се отнасят и трансформаторите, които се използват в автоматични, електромеханични, изчислителни, радиотехнически, импулсни и други устройства. Обикновено това са трансформатори с малка мощност (до 1000 VA).

Устройство на трансформаторите. Като се отчита предназначението на книгата, тук се разглежда устройството на маломощните трансформатори.

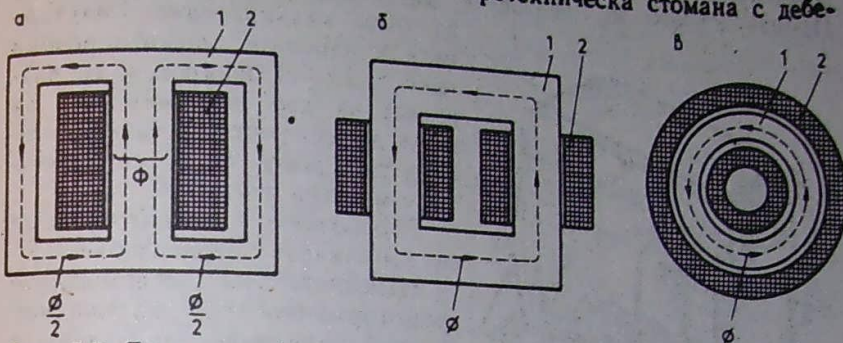
Основните части на трансформатора са магнитопроводът и намотките. Тези части на магнитопровода, около които се поставят намотките, се наричат *ядра*, а частите, които служат за затваряне на магнитната система, се наричат *ремни*.

В зависимост от конфигурацията на магнитната система еднофазните трансформатори се разделят на *мантийни* (фиг. 5.2а), *ядрени* (фиг. 5.2б) и *торонидни* (фиг. 5.2в).

Магнитопроводите на всеки от посочените три вида трансфор-

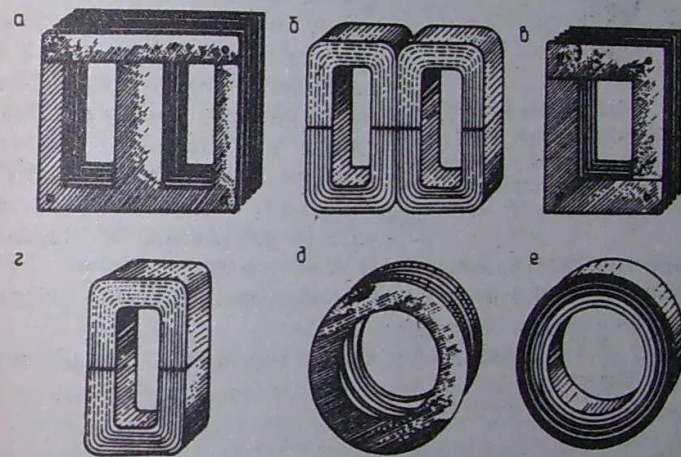
матори могат да бъдат пластинчати (фиг. 5.3а, в, д) или лентови (фиг. 5.2б, г, е).

Пластинчатите магнитопроводи се набират от пластини, които са щанцовани от листова електротехническа стомана с дебе-



Фиг. 5.2. Типове еднофазни трансформатори

а — мантиен; б — ядрен; в — торонидален; 1 — магнитопровод; 2 — намотки



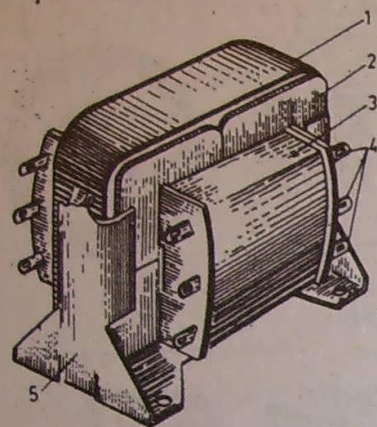
Фиг. 5.3. Магнитопроводи на маломощни еднофазни трансформатори

а — мантиен пластинчат; б — мантиен лентов; в — ядрен пластинчат; г — ядрен лентов; д — торонидален пластинчат; е — торонидален лентов

лина 0,2—0,5 mm. Пластините могат да бъдат Ш-образни (фиг. 5.3а), Г-образни (фиг. 5.3в) или О-образни (фиг. 5.3д). Пластините са изолирани с окисен слой или лак. Магнитопроводите от фиг. 5.3а, в обикновено се набират чрез преплитане и се стягат с изолирани шпилки, които преминават през предвидените за целта отвори.

Лентовите магнитопроводи се изработват чрез навиване на

тясна лента от студеновалцована електротехническа стомана или специални желязо-никелови сплави с дебелина 0,08—0,35 мм. Предварително лентата е покрита с изолиращ и слепващ слой. Производството на лентовите магнитопроводи по-лесно може



Фиг. 5.4. Общ вид на еднофазен трансформатор с малка мощност
1 — притягаща лента; 2 — магнитен лентов магнитопровод; 3 — намотки; 4 — изводи; 5 — стойка

да бъде механизмирано. Мантийните и ядрените магнитопроводи (фиг. 5.3 б, г) обикновено се разрязват на две половини, за да може да се поставят намотките. След това двете части се притягат с метални ленти.

Торондните магнитопроводи се изпълняват неразглобяеми.

Намотките на маломощните трансформатори се изпълняват от емайлиран меден проводник с кръгло сечение. Най-често те са многослойни, като се навиват върху макара от електрокартон или текстолит. Напоследък се използват и монолитни пластмасови макари. Между отделните слоеве и отделните намотки се поставя хартиена или друг вид изолация. В някои случаи намотката се изпълнява от отделни ча-

сти, наречени галети, които имат самостоятелни макари. Галетите се надяват на ядрото на магнитопровода и след това се свързват помежду си по един или друг начин.

На фиг. 5.4 е показан общ вид на еднофазен трансформатор с малка мощност.

5.2. Основни уравнения на еднофазен трансформатор

5.2.1. Уравнения на трансформатора за моментните стойности

Разглежда се принципната електромагнитна схема на трансформатора, показана на фиг. 5.5. На нея с u_1 , u_2 , i_1 , i_2 са означени моментните стойности на първичните и вторичните напрежения и токове.

Токовете i_1 и i_2 , преминаващи през съответните намотки с брой

на навивките w_1 и w_2 , създават първичното и вторичното м. д. н.¹ $i_1 w_1$ и $i_2 w_2$. Тяхната сума дава резултатното м. д. н.

(5.4)

$$i_m w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2.$$

Токът i_m се нарича намагнитващ ток. Това е фиктивен ток, който, ако преминава през първичната намотка, би създавал м. д. н., равно на сумата от първичното и вторичното м. д. н. Намагнитващият ток добива реален смисъл при празен ход (отворена вторична намотка). Тогава преминаващият през първичната намотка ток е равен на намагнитващия ($i_1 = i_m$).

Резултатното м. д. н. $i_m w_1$ възбужда основния магнитен поток Φ , който се затваря през стоманата на магнитопровода. Той се вплита с всички навивки на двете намотки, т. е. това е поток на взаимна индукция. Моментната стойност на основния магнитен поток е

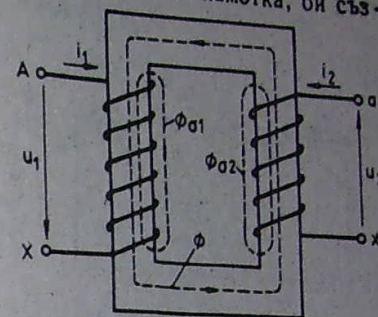
(5.5)

$$\Phi = \frac{i_m w_1}{R_m},$$

където R_m е магнитното съпротивление на магнитопровода.

Наред с основния магнитен поток в трансформатора винаги съществуват и потоци на разсейване $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, които частично се затварят през въздуха. Картината на тяхното разпределение е много сложна. Действителната картина заменяме с еквивалентна на нея опростена, както е показано на фиг. 5.5, където линиите на потока $\Phi_{\sigma 1}$ обхващат всички навивки само на първичната намотка, а линиите на потока $\Phi_{\sigma 2}$ — всички навивки само на вторичната намотка. Потокът $\Phi_{\sigma 1}$ е пропорционален на i_1 , а $\Phi_{\sigma 2}$ — на i_2 . Потоците на разсейване са много малки в сравнение с основния поток, тъй като магнитната проницаемост на стоманата е много по-голяма от магнитната проницаемост на въздуха. Независимо от това потоците на разсейване оказват съществено влияние върху техническите показатели и характеристиките на трансформатора.

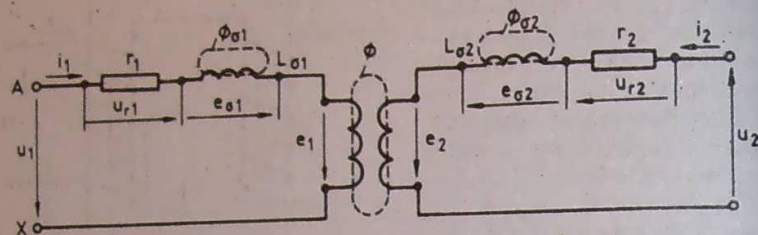
¹ Магнитодвижещо напрежение (м. д. н.) — величина, еквивалентна на магнитовъзбудителя ток.



Фиг. 5.5. Принципна електромагнитна схема на еднофазен двунамотъчен трансформатор

Основният магнитен поток индутира в двете намотки е. д. н. с моментни стойности

$$(5.6) \quad \begin{cases} e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \\ e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \end{cases}$$



Фиг. 5.6. Схематично представяне на еднофазен двунамотъчен трансформатор

Моментните стойности на е. д. н., индутирани в двете намотки от потоците на разсейване, се определят от

$$(5.7) \quad \begin{cases} e_{o1} = -L_{o1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_{o2} = -L_{o2} \frac{di_2}{dt}, \end{cases}$$

където L_{o1} и L_{o2} са индуктивностите на двете намотки, които съответствуват на потоците на разсейване Φ_{o1} и Φ_{o2} .

Във връзка с казаното трансформаторът може да се представи схематично, както е показано на фиг. 5.6, където r_1 и r_2 са активните съпротивления на двете намотки, а $u_{r1} = i_1 r_1$ и $u_{r2} = i_2 r_2$ — съответните падове на напрежение. Със стрелки са показани условните положителни посоки на величините.

Като се приложи вторият закон на Кирхоф $\sum u = \sum e$ за контурите на първичната и вторичната намотка, се получава

$$\begin{cases} u_1 - u_{r1} = -e_1 - e_{o1}; \\ u_2 + u_{r2} = e_2 + e_{o2}, \end{cases}$$

откъдето

$$\begin{cases} u_1 = -e_1 + u_{r1} - e_{o1} = -e_1 + i_1 r_1 + L_{o1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_2 = u_2 + u_{r2} - e_{o2} = u_2 + i_2 r_2 + L_{o2} \frac{di_2}{dt}. \end{cases}$$

Пълната система уравнения на трансформатора включва: 1) уравнение за равновесие на напреженията в първичната намотка; 2) уравнения за равновесие на напреженията във вторичната намотка; 3) уравнение за м. д. н. (5.4), т. е.

$$(5.8) \quad \begin{cases} u_1 = -e_1 + i_1 r_1 + L_{o1} \frac{di_1}{dt}; \\ e_2 = u_2 + i_2 r_2 + L_{o2} \frac{di_2}{dt}; \\ i_1 w_1 = i_m w_1 + (-i_2 w_2). \end{cases}$$

Получените уравнения за моментните стойности имат най-общ характер, тъй като не се налагат никакви ограничения относно закона, по който се изменят във времето напреженията и токовете.

На урavn. (5.8) може да се даде следното тълкуване. От първото уравнение следва, че приложеното напрежение u_1 поддържа равновесие с е. д. н., индутирано в първичната намотка, и с активния и индуктивния пад на напрежение в нея. От второто уравнение следва, че индутираното във вторичната намотка е. д. н. e_2 поддържа равновесие с напрежението на изходите на намотката и активния и индуктивния пад на напрежение в нея, а от третото уравнение следва, че първичното м. д. н. $i_1 w_1$ има две съставки. Едната съставка ($-i_2 w_2$) е равна по големина и противоположна по посока на вторичното м. д. н. $i_2 w_2$, а другата съставка $i_m w_1$ е необходима за възбуждане на основния магнитен поток.

5.2.2. Уравнения на трансформатора в комплексна форма

Най-често напреженията и токовете в трансформатора са синусоидни функции на времето с кръгова честота $\omega = 2\pi f$, където f честотата на захранващото напрежение. Единствено намагнитващия ток i_m не е синусоиден, което следва от (5.5). Поради това, че магнитното съпротивление R_m е нелинейно, при синусоиден магнитен поток Φ токът i_m няма да бъде синусоиден. Затова е необходимо несинусоидният ток i_m да се замени с еквивалентна синусоида. Тогава основните уравнения на трансформатора (5.8) може да се запишат в комплексна форма:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\omega L_{\sigma 1} \dot{I}_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j\omega L_{\sigma 2} \dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_2 \omega_2 + (-\dot{I}_2 \omega_2), \end{cases}$$

или

$$(5.9) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2 + j\dot{I}_2 x_2; \\ \dot{I}_1 \omega_1 = \dot{I}_2 \omega_2 + (-\dot{I}_2 \omega_2); \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \left(-\frac{\dot{I}_2}{k}\right); \end{cases}$$

където $x_1 = \omega L_{\sigma 1}$ и $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$ са индуктивните съпротивления на разсейване на първичната и вторичната намотка, Z_1 и Z_2 — съответните импеданси.

От (5.6) при преминаване в комплексна форма на записване се получава

$$(5.10) \quad \begin{cases} \dot{E}_1 = -j\omega \omega_1 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j2\pi f \omega_1 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j\sqrt{2}\pi f \omega_1 \dot{\Phi}_m; \\ \dot{E}_2 = -j\omega \omega_2 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j2\pi f \omega_2 \frac{\dot{\Phi}_m}{\sqrt{2}} = -j\sqrt{2}\pi f \omega_2 \dot{\Phi}_m, \end{cases}$$

където Φ_m е максималната стойност на магнитния поток.

От (5.10) се вижда, че индукираните е. д. н. в двете намотки имат ефективни стойности

$$(5.11) \quad \begin{cases} E_1 = \sqrt{2}\pi f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m; \\ E_2 = \sqrt{2}\pi f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m \end{cases}$$

и изостават по фаза от магнитния поток на 90° .

Уравнение (5.5), записано в комплексна форма, има вида

$$(5.12) \quad \dot{\Phi}_m = \frac{\sqrt{2} \dot{I}_m \omega_1}{R_m},$$

където I_m е ефективната стойност на намагнитващия ток.

Заместването на (5.12) в (5.10) дава

$$(5.13) \quad \begin{cases} \dot{E}_1 = -j \frac{\omega \omega_1^2}{R_m} \dot{I}_m = -j x_{r1} \dot{I}_m; \\ \dot{E}_2 = -j \frac{\omega \omega_1 \omega_2}{R_m} \dot{I}_m = -j x_{12} \dot{I}_m, \end{cases}$$

където

$$(5.14) \quad x_{r1} = \frac{\omega \omega_1^2}{R_m} \text{ е главното индуктивно съпротивление на първичната намотка;}$$

$$(5.15) \quad x_{12} = \frac{\omega \omega_1 \omega_2}{R_m} \text{ — индуктивното съпротивление на взаимна индукция между двете намотки.}$$

5.2.3. Приведени величини в трансформатора

За облекчаване на анализа на процесите в трансформатора, нагледност при построяване на векторни диаграми и за представяне на трансформатора с еквивалентна заместваща схема всички негови намотки се привеждат към еднакъв брой навивки. Обикновено вторичната намотка се привежда към броя на навивките на първичната намотка. Да се приведе вторичната намотка към първичната означава действителната намотка с брой на навивките ω_2 да се замени с фиктивна или приведена намотка с брой на навивките $\omega'_2 = \omega_1$. При това всички вторични величини се привеждат така, че енергийните съотношения да се запазят. Приведените величини ще означаваме с горен индекс прим.

Съгласно (5.11)

$$E_2 = \sqrt{2}\pi f \omega_2 \Phi_m$$

Тогава

$$E'_2 = \sqrt{2}\pi f \omega'_2 \Phi_m = \sqrt{2}\pi f \omega_1 \Phi_m = E_1$$

и следователно приведеното вторично е. д. н. е

$$(5.16) \quad E'_2 = E_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = E_2 k = E_1.$$

Аналогично приведеното вторично напрежение е

$$(5.17) \quad U'_2 = U_2 \frac{\omega_1}{\omega_2} = U_2 k.$$

М.д.н. на реалната и приведената намотка трябва да са равни:

$$I_2 \omega_2 = I'_2 \omega'_2 = I'_2 \omega_1,$$

откъдето приведенят вторичен ток

$$(5.18) \quad I'_2 = I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I_2 \frac{1}{k}.$$

Електрическите загуби в реалната и приведената намотка трябва да са равни:

$$I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2,$$

откъдето приведеното активно съпротивление на вторичната намотка е

$$(5.19) \quad r'_2 = r_2 k^2.$$

Като се излезе от постоянството на отношенията

$$\frac{x_2'}{r_2'} = \frac{x_2}{r_2},$$

получава се приведеното индуктивно съпротивление на разсейване на вторичната намотка

$$(5.20) \quad x_2' = x_2 k^2.$$

От (5.19) и (5.20) следва, че приведеното пълно съпротивление на вторичната намотка е

$$(5.21) \quad z_2' = z_2 k^2.$$

Системата уравнения (5.9) за приведения трансформатор добива вида

$$(5.22) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2' + j \dot{I}_2 x_2'; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2) \end{cases}; \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2'; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}_2). \end{cases}$$

Уравнението за м. д. н. в (5.9) тук се превръща в уравнение за токовете.

Както следва от уравн. (5.13) — (5.16):

$$(5.23) \quad \dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -j \dot{I}_m x_{r1} = -j \dot{I}_m x_{12}',$$

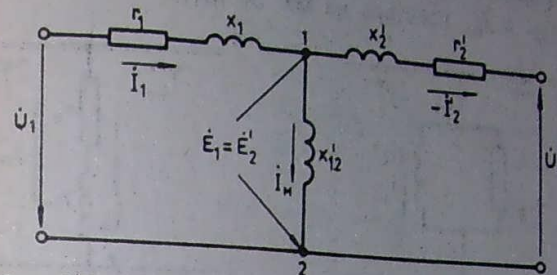
където x_{12}' е индуктивното съпротивление на взаимна индукция на приведения трансформатор, което е равно на главното индуктивно съпротивление на първичната намотка x_{r1} .

5.3. Заместващи схеми на трансформатора

5.3.1. Заместваща схема без отчитане на загубите в стоманата

Изследването на процесите в електромагнитно свързани вериги значително се облекчава и става по-нагледно, като се използват заместващи схеми, при които електромагнитните връзки между веригите се заменят с електрически. Заместващата схема на трансформатора се съставя въз основа на изведените уравнения за приведения транс-

форматор. На системата уравнения (5.22), като се вземе предвид (5.23), съответствува T-образната заместваща схема, показана на фиг. 5.7. Очевидно е, че уравненията, съставени въз основа на законите на Кирхоф за тази схема, ще бъдат същите, както и уравн. (5.22).



Фиг. 5.7. Заместваща схема на трансформатора без отчитане на загубите в стоманата

Клонът 1—2, през който преминава намагнитващият ток, се нарича н а м а г н и т в а щ к л о н. Напрежението върху него е

$$(5.25) \quad \dot{U}_{12} = j \dot{I}_m x_{12}' = -\dot{E}_1' = -\dot{E}_2'.$$

5.3.2. Заместваща схема с отчитане на загубите в стоманата

Загубите в стоманата на магнитопровода p_c при дадена честота са пропорционални на следните величини:

$$p_c = B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_1^2 \equiv U_{12}^2,$$

където B_m е амплитудата на магнитната индукция в магнитопровода.

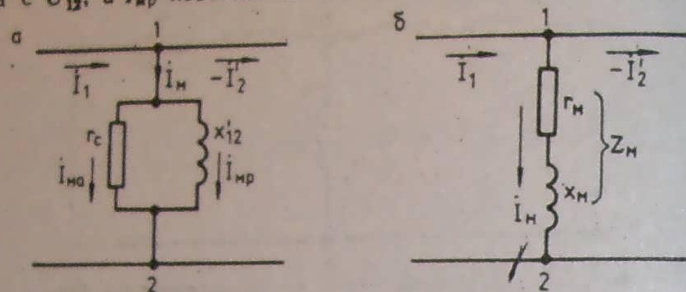
Ако се включи активно съпротивление r_c между т. 1—2, загубите в това съпротивление също ще бъдат пропорционални на U_{12}^2 . Стойността на съпротивлението r_c може да се подбере така, че загубите в него да са равни на загубите в стоманата:

$$p_c = \frac{U_{12}^2}{r_c} = \frac{E_1^2}{r_c},$$

откъдето

$$(5.25) \quad r_c = \frac{E_1^2}{p_c}.$$

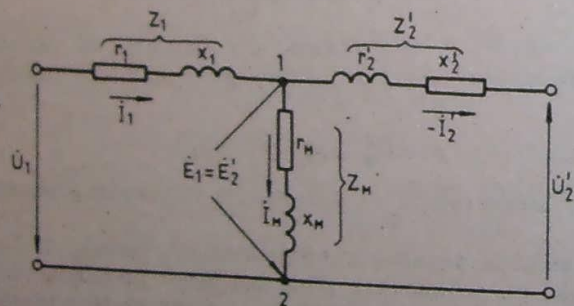
Вече намагнитващият ток I_m има две съставки (фиг. 5.8 а): активна I_{ma} , която определя мощността на загубите в стоманата, и реактивна I_{mr} , която възбужда основния магнитен поток в магнитопровода. Двете съставки са в квадратура, като I_{ma} е във фаза с $\dot{U}_{12}$, а I_{mr} изостава на 90° от него.



Фиг. 5.8. Намагнитващ клон на заместващата схема при отчитане на загубите в стоманата

Използването на заместващата схема е по-удобно, ако се обединят двете паралелни вериги от фиг. 5.8 а в една, както е показано на фиг. 5.8 б. Тогава пълното съпротивление на тази верига е

$$(5.26) \quad Z_m = \frac{r_c \cdot jx'_{12}}{r_c + jx'_{12}} = \frac{r_c \cdot x'_{12}}{r_c^2 + x_{12}'^2} + j \frac{r_c^2 \cdot x'_{12}}{r_c^2 + x_{12}'^2} = r_m + jx_m$$



Фиг. 5.9. Заместваща схема на трансформатора с отчитане на загубите в стоманата

Тъй като загубите в стоманата са сравнително малки, то $r_c \gg x'_{12}$ и тогава

$$(5.27) \quad r_m \approx \frac{x_{12}'^2}{r_c}; \quad x_m \approx x'_{12} = x_{11}$$

Заместващата схема на трансформатора с отчитане на загубите в стоманата е показана на фиг. 5.9. Когато се отчитат загубите в стоманата, основните уравнения на трансформатора (5.22) остават непроменени, но вместо (5.23) е в сила

(5.28)

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -I_m Z_m$$

5.3.3. Опростена заместваща схема

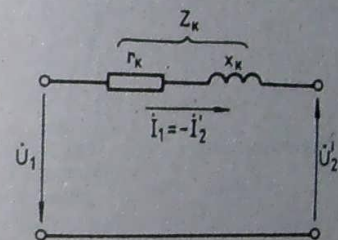
Тъй като $z_m \approx z_1 \approx z_2$, в много случаи може да се приеме $z_m = \infty$, т. е. $I_m \approx 0$. Тогава от основните уравнения (5.22) се получава

$$(5.29) \quad \begin{cases} U_1 = -U'_2 + I_1 r_k + jI_1 x_k; \\ I_1 = -I'_2; \end{cases} \quad \begin{cases} U_1 = -U'_2 + I_1 Z_k; \\ I_1 = -I'_2; \end{cases}$$

където

(5.30)

$$r_k = r_1 + r'_2, \quad x'_2 = x_1 + x'_2$$



Фиг. 5.10. Опростена заместваща схема на трансформатора

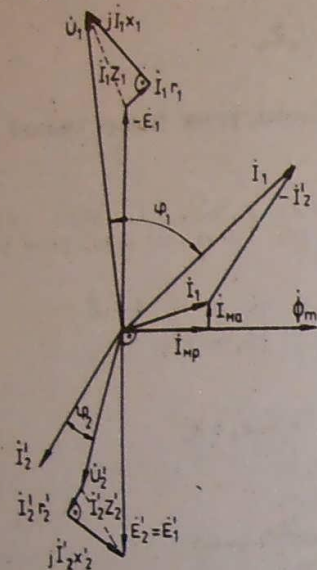
и Z_k се наричат съответно активно, индуктивно и пълно съпротивление на късо съединение на трансформатора.

На уравни. (5.29) съответствува заместващата схема, показана на фиг. 5.10.

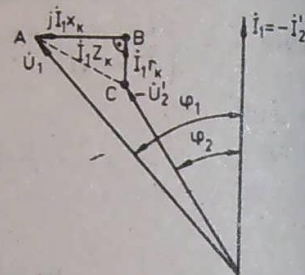
5.4. Векторни диаграми на трансформатора

Комплексните уравнения (5.22) може да се изобразят графично във вид на векторна диаграма, която нагледно показва съотношенията на токовете, е. д. н., напреженията и ъглите на дефазиране между тях.

Векторната диаграма, която представлява геометричен образ на урavn. (5.22), при активно-индуктивно натоварване се построява в следната последователност (фиг. 5.11).
Построяват се $\dot{U}'_2$ и изоставащият от него на ъгъл φ_2 ток $\dot{I}'_2$.



Фиг. 5.11. Векторна диаграма на трансформатора



Фиг. 5.12. Опростена векторна диаграма на трансформатора

Съгласно второто уравнение на (5.22) към $\dot{U}'_2$ се прибавят $\dot{I}'_2 r'_2$ успоредно на $\dot{I}_2$, $j\dot{I}'_2 x'_2$ на 90° напред и се получава $\dot{E}_1 = -\dot{E}_2$.

На 90° напред спрямо $\dot{E}_1$ се построяват $\dot{\Phi}_m$ и $\dot{I}_{mp}$ във фаза с $\dot{\Phi}_m$. На 90° напред спрямо $\dot{I}_{mp}$ се прибавя $\dot{I}_{ma}$ и се получава $\dot{I}_m$.

Съгласно третото уравнение на (5.22) към $\dot{I}_m$ се прибавя $(-\dot{I}'_2)$ и се получава $\dot{I}_1$.

Съгласно първото уравнение на (5.22) към $-\dot{E}_1$ се прибавят $\dot{I}_1 r_1$ успоредно на $\dot{I}_1$, $j\dot{I}_1 x_1$ на 90° напред и се получава $\dot{U}_1$. Ъгълът между $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$ е φ_1 .

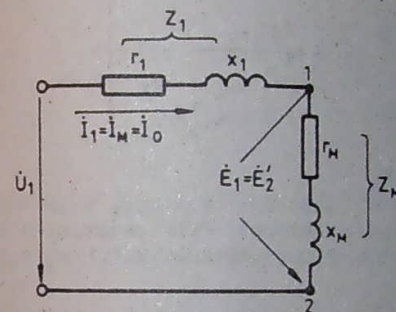
По аналогичен начин може да се построи векторната диаграма при активно-капацитивен товар.

Опростената векторна диаграма на трансформатора на фиг. 5.12 е построена в съответствие с (5.29). Най-напред се построяват $-\dot{U}'_2$ и $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2$, като ъгълът между тях е φ_2 . Към $-\dot{U}'_2$ се прибавят $\dot{I}_1 r_1$ успоредно на $\dot{I}_1$, $j\dot{I}_1 x_1$ на 90° напред и се получава $\dot{U}_1$.

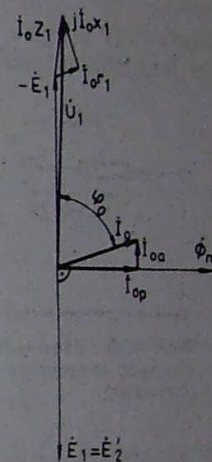
5.5. Празен ход на трансформатора

Трансформаторът работи на празен ход (п. х.), когато вторичната му намотка е отворена, т. е. $I_2 = 0$. Тогава системата уравнения (5.22) добива вида

$$(5.31) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{U}'_2; \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_m = \dot{I}_0. \end{cases}$$



Фиг. 5.13. Заместваща схема на трансформатора при празен ход



Фиг. 5.14. Векторна диаграма на трансформатора при празен ход

В случая намагнитващият ток $\dot{I}_m$ е равен на тока на празен ход $\dot{I}_0$.

На (5.31) съответствуват заместващата схема и векторната диаграма при п. х., показани съответно на фиг. 5.13 и 5.14.

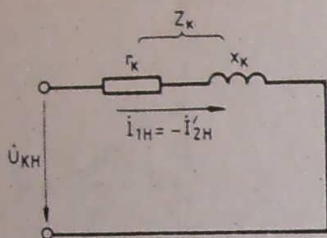
Интерес представлява опитното изследване на трансформатора при п. х. Опитът на празен ход дава възможност да се определят следните характерни за трансформатора величини: коефициент на трансформация, токът на п. х., мощността при празен ход, параметрите на заместващата схема при п. х. Токът на празен ход е сравнително малък (1—10% от номиналния ток). Мощността при празен ход P_0 е равна на сумата от електрическите загуби при празен ход $I_0^2 r_1$ и загубите в стоманата p_c . Тъй като $I_0^2 r_1 \ll p_c$, при празен ход $I_0^2 r_1$ и загубите в стоманата p_c . Тъй като $I_0^2 r_1 \ll p_c$, практически може да се счита, че измерената мощност при празен ход е равна на загубите в стоманата на магнитопровода ($P_0 \approx p_c$).

5.6. Късо съединение на трансформатора

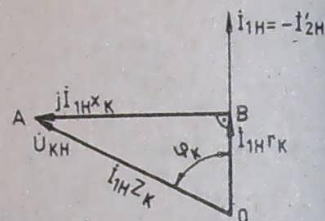
При режим на късо (к. с.) вторичната намотка на трансформатора е затворена на късо и следователно $U_2 = 0$. Тогава системата уравнения (5.22) добива вида

$$(5.32) \quad \begin{cases} U_1 = -\dot{E}_1 + I_1 r_1 + j I_1 x_1 = -\dot{E}_1 + I_1 Z_1; \\ \dot{E}_2 = I_2' r_2' + j I_2' x_2' = I_2' Z_2'; \\ I_1 = I_m + (-I_2'). \end{cases}$$

Различават се два вида късо съединение: аварийно (експлоатационно) к. с. и опит на к. с.



Фиг. 5.15. Заместваща схема при късо съединение на трансформатор



Фиг. 5.16. Векторна диаграма при късо съединение на трансформатор

В първия случай на първичната намотка е подадено номиналното напрежение. Този режим е много опасен за трансформатора, тъй като токовете в намотките могат да надвишат многократно номиналните си стойности. Този режим може да настъпи в условията на експлоатацията и ако трансформаторът не бъде своевременно изключен от защитните средства, той ще претърпи авария.

Опитът на к. с. се провежда в лабораторни условия с цел да се определят важни параметри на трансформатора. Към първичната намотка се подава понижено напрежение $U_{кн}$, така че токовете в намотките да бъдат равни на номиналните. Напрежението $U_{кн}$ се нарича номинално напрежение на к. с. В мощните трансформатори то е равно на 4–7%, а в маломощните може да достигне 10–17% от номиналното напрежение.

Тъй като опитът на к. с. се провежда при силно понижено напрежение, е. д. н. E_1 , а следователно и магнитният поток в магнитопровода са твърде малки. Намагнитващият ток I_m , необходим за възбуждане на този поток, е незначителен и може да се пре-

небрегне. След като в (5.29) се положи $U_2' = 0$ и се вземат предвид условията на провеждане на опита, може да се запише

$$(5.33) \quad \begin{cases} \dot{U}_{кн} = I_{1H} r_k + j I_{1H} x_k = I_{1H} Z_k; \\ I_{1H} = -I_{2H}' \end{cases}$$

На (5.33) съответствуват заместващата схема и векторната диаграма, показани съответно на фиг. 5.15 и 5.16. Триъгълникът ABC на фиг. 5.16 се нарича триъгълник на късо съединение.

Опитът на к. с. позволява да се определят следните величини: параметрите на заместващата схема при к. с., загубите при к. с., напрежението на к. с. Тъй като при опита на късо съединение основният магнитен поток е малък, загубите в стоманата са много малки и могат да се пренебрегнат. Следователно измерената мощност при късо съединение практически е равна на електрическите загуби в намотките на трансформатора ($P_k \approx P_{ел}$).

5.7. Изменение на напрежението и външна характеристика на трансформатора

Обикновено трансформаторът работи при $U_1 = U_{1H} = \text{const}$ и $f = f_H = \text{const}$. При изменение на натоварването (тока I_2) вторичното напрежение U_2 също се изменя. Процентното изменение на напрежението е

$$(5.34) \quad \Delta u = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 = \frac{U_{20}' - U_2'}{U_{20}'} 100 = \frac{U_{1H} - U_2'}{U_{1H}} 100, \%$$

където

U_{20} е вторичното напрежение при п.х.;

U_2 — вторичното напрежение при натоварване.

На фиг. 5.17 е показана част от опростената векторна диаграма от фиг. 5.12. Прието е, че векторите, изобразяващи напреженията U_{1H} и $-U_2'$, са успоредни. За това има достатъчно основание, тъй като страните на триъгълника на к. с. са много малки в сравнение с големините на U_{1H} и U_2' .

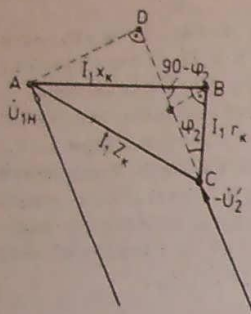
От фиг. 5.17 следва

$$(5.35) \quad \begin{aligned} \Delta u &= \frac{CD}{U_{1H}} 100 = \frac{I_{1H} r_k \cos \varphi_2 + I_{1H} x_k \sin \varphi_2}{U_{1H}} 100 = \\ &= \beta \left[\frac{I_{1H} r_k}{U_{1H}} 100 \cos \varphi_2 + \frac{I_{1H} x_k}{U_{1H}} 100 \sin \varphi_2 \right] = \\ &= \beta (u_{к2} \cos \varphi_2 + u_{к2} \sin \varphi_2), \end{aligned}$$

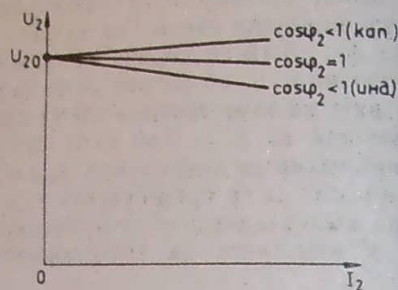
където

$$(5.36) \quad \beta = \frac{I_1}{I_{1n}} = \frac{I_2}{I_{2n}} \text{ е относителното натоварване;}$$

$u_{ка}, u_{кр}$ — относителното активно и реактивно напрежение на к. с.



Фиг. 5.17. Определяне на изменението на напрежението на трансформатор



Фиг. 5.18. Външни характеристики на трансформатора

В (5.35) $\varphi_2 > 0$ при активно-индуктивен товар и $\varphi_2 < 0$ при активно-капацитивен товар. Вижда се, че изменението на напрежението зависи както от натоварването (β), така и от характера на товара (φ_2). При активно-капацитивно натоварване Δu може да се получи отрицателно, което означава, че U_2 е по-голямо от U_{20} , т. е. при увеличаване на натоварването вторичното напрежение расте.

Външната характеристика на трансформатора представлява зависимостта $U_2 = f(\beta)$ или $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$. На фиг. 5.18 са показани външни характеристики при различен характер на товара. Те показват, че при активен и активно-индуктивен товар с увеличаване на I_2 напрежението U_2 се намалява, а при активно-капацитивен товар — нараства. Трябва да се отбележи, че при трансформатори с малка мощност, при които $r_k \gg x_k$ дори и при активно-капацитивен товар, напрежението се намалява при увеличаване на натоварването.

Колкото по-малко се изменя напрежението при изменение на натоварването, толкова по-добри са експлоатационните качества на трансформатора.

5.8. Загуби и коефициент на полезно действие на трансформатора

Коефициентът на полезно действие (к. п. д.) η представлява отношението на отдадената (полезната) P_2 към подадената (консумираната) P_1 активна мощност на трансформатора:

$$(5.37) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

К. п. д. на мощните трансформатори достига 0,96—0,99, а на маломощните — 0,6—0,92. Когато к. п. д. е под 0,85, може да се използва прекият метод за неговото определяне в съответствие с (5.37). При по-големи стойности на к. п. д. прекият метод не е достатъчно точен и затова се препоръчва к. п. д. да се определя по косвения метод в съответствие с формулата

$$(5.38) \quad \eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{P_2}{P_2 + p_c + p_{ел}},$$

където Σp е сумата от загубите на мощност в трансформатора.

При прекия метод се измерват мощностите P_1 и P_2 , а при непрекия — загубите в стоманата p_c и електрическите загуби $p_{ел}$. Последните лесно се определят при провеждане на опита на празен ход и опита на късо съединение.

За практически цели изразът (5.38) се преработва по следния начин.

Тъй като $U_1 = \text{const}$, а $E_1 \approx U_1$, е. д. н., а следователно и магнитният поток в магнитопровода ще бъдат практически постоянни. Затова може да се счита, че загубите в стоманата p_c са постоянни, т. е. не зависят от натоварването.

Електрическите загуби в намотките $p_{ел}$, като се вземе предвид (5.36), може да се запишат във вида

$$(5.39) \quad p_{ел} = I_1^2 r_k = \beta^2 I_{1n}^2 r_k = \beta^2 p_{елн},$$

където с $p_{елн}$ са означени електрическите загуби при токове в намотките, равни на номиналните.

Отдадената активна мощност може да се представи по следния начин:

$$(5.40) \quad P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta U_{2n} I_{2n} \cos \varphi_2 \approx \beta U_{2n} \cos \varphi_2 = \beta S_n \cos \varphi_2,$$

където

$$(5.41) \quad S_n = U_{2n} I_{2n} \text{ е номиналната мощност на трансформатора.}$$

След заместване на (5.39) и (5.40) в (5.38) се получава

$$(5.42) \quad \eta = \frac{\beta S_m \cos \varphi_2}{\beta S_m \cos \varphi_2 + p_c + \beta^2 p_{елл}}$$

Приравняването на нула на първата производна на η спрямо β дава

$$(5.43) \quad \beta_m^2 p_{елл} = p_c \text{ или } p_{ел} = p_c$$

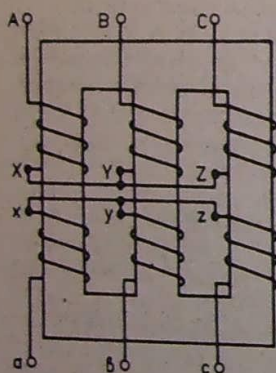
т. е. к.п.д. има максимум при относително натоварване

$$(5.44) \quad \beta_m = \sqrt{\frac{p_c}{p_{елл}}}$$

при което загубите в стоманата са равни на електрическите загуби в намотките. Обикновено β_m е в диапазона 0,5—0,8.

5.9 Трифазни трансформатори

За трансформиране на трифазен ток може да се използва т. нар. групов трансформатор, който се състои от три еднофазни трансформатора, но най-често се използва трифазен ядрен трансформатор (фиг. 5.19). Както е показано на фигурата, на всяко ядро се поставят първичната и вторичната намотка на една фаза. Началата на фазните намотки са означени с A, B, C и a, b, c а краищата — с X, Y, Z и x, y, z.



Фиг. 5.19. Трифазен ядрен трансформатор

За една фаза на трифазния трансформатор.

Намотките на трифазните трансформатори могат да бъдат свързани в звезда, триъгълник или зигзаг.

При работа на трифазния трансформатор в симетричен режим всяка от трите фази може да се разглежда отделно. Затова основните уравнения, заместващите схеми, векторните диаграми и всички останали зависимости, които бяха дадени за еднофазния трансформатор, важат и

за една фаза на трифазния трансформатор.

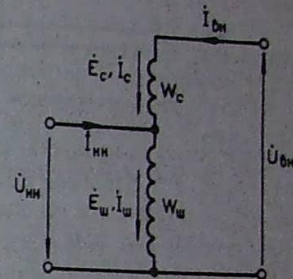
5.10. Специални трансформатори

5.10.1. Автотрансформатори

Автотрансформатор се нарича трансформатор, между намотките на който освен електромагнитна има и електрическа връзка.

На фиг. 5.20 е дадена схемата на еднофазен автотрансформатор. Намотката с брой на навивките w_w се нарича паралелна намотка, а намотката с брой на навивките w_c — последователна.

Даден автотрансформатор може да се използва както за повишаване, така и за намаляване на напрежението. В първия случай първична е мрежата с ниското напрежение (н. н.) U_{nn} , а вторична е мрежата с високото напрежение (в. н.) $U_{вн}$, като посоката на предаване на енергията е от мрежа н. н. към мрежа в. н. Във втория случай първична е мрежата в. н., като посоката на предаване на енергията е обратна на тази от първия случай.



Фиг. 5.20. Схема на еднофазен автотрансформатор

При разглеждане на основните съотношения в автотрансформатора се пренебрегват загубите, падовете на напрежение и намагнитващият ток.

Отношенията на е. д. н. и токовете на паралелната и последователната намотка се определят както при обикновения трансформатор:

$$(5.45) \quad k = \frac{w_w}{w_c} = \frac{E_w}{E_c} = \frac{I_c}{I_w}$$

При автотрансформаторите се дефинира коефициент на трансформация на напреженията и токовете на мрежа в. н. и мрежа н. н.:

$$(5.46) \quad k = \frac{U_{вн}}{U_{нн}} = \frac{I_{нн}}{I_{вн}} > 1.$$

Мощността, която се предава от едната намотка към другата по електромагнитен път, се нарича електромагнитна или изчислителна мощност и се определя от

$$(5.47) \quad S_m = E_w I_w = E_c I_c$$

Мощността, която се предава от едната мрежа към другата, се нарича проходна мощност и е равна на

$$(5.48) \quad S_{\text{пр}} = U_{\text{нн}} I_{\text{нн}} = U_{\text{вн}} I_{\text{вн}}.$$

Отношението на тези мощности е

$$(5.49) \quad \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{пр}}} = \frac{E_c I_c}{U_{\text{вн}} I_{\text{вн}}} = \frac{(U_{\text{вн}} - U_{\text{нн}}) I_{\text{вн}}}{U_{\text{вн}} I_{\text{вн}}} = 1 - \frac{1}{k} < 1.$$

Следователно при автотрансформатора $S_{\text{н}} < S_{\text{пр}}$, тъй като част от мощността се предава директно от едната мрежа към другата по електрически път.

Разходът на материали, размерите и стойността на един трансформатор се определят от $S_{\text{н}}$. Понеже при автотрансформатора $S_{\text{н}} < S_{\text{пр}}$, по принцип използването му е по-изгодно от използването на обикновен трансформатор, при който $S_{\text{н}} = S_{\text{пр}}$. От (5.49) се вижда, че използването на автотрансформатор е толкова по-изгодно, колкото k е по-близък до единица. Автотрансформаторите имат значителни предимства само при $k=1,2-2,5$.

Автотрансформаторите имат и определени недостатъци: наличие на електрическа връзка между двете намотки, поради което изолацията на всяка от тях спрямо корпуса трябва да бъде изчислена за напрежението на мрежа в. н.; голям ток на късо съединение; възможност за рязко повишаване на напрежението на страната н. н., например при прекъсване на $w_{\text{ш}}$ или късо съединение на w_c .

Трифазните автотрансформатори се използват за пускане в ход на синхронни и асинхронни двигатели, а също така в енергийните системи за свързване на мрежи с различни напрежения.

Маломощни автотрансформатори се използват в някои устройства на автоматиката и електрониката. В изпитвателните лаборатории широко се използват регулируеми автотрансформатори, които позволяват плавно да се изменя напрежението от 0 до 250 V.

5.10.2. Импулсни трансформатори

Импулсният трансформатор служи за трансформиране на кратковременни напрежителни импулси с продължителност няколко микросекунди и по-малка.

Импулсните трансформатори широко се използват в схемите на радиотехническите и импулсните устройства (в радиолокационната техника, в импулсната радиовръзка, в телевизията, в из-

числителната техника и др.). С тяхна помощ в посочените устройства се повишава или намалява амплитудата на напрежението, съгласуват се съпротивленията на източника и товара, променя се поляритетът на импулсите, осъществява се междукаскадна връзка в усилвателите и пр.

Основното изискване към импулсните трансформатори е минимално изкривяване формата на трансформираните импулси.

За да се изясни принципната възможност за трансформиране на кратковременни импулси, разглеждаме идеален трансформатор (без загуби и капацитивни връзки), който работи на празен ход. Първичната му намотка е включена към генератор на пръвоугълни импулси с продължителност $t_{\text{и}}$ и период $T_{\text{и}}$ (фиг. 5.21).

Токът в първичната намотка при подаването и прекратяването на импулсите ще се изменя съгласно изразите

$$(5.50) \quad i_1 = \frac{U_1}{r_1} \left[1 - e^{-\frac{t}{T}} \right] \text{ и } i_1 = \frac{U_1}{r_1} e^{-\frac{t}{T}},$$

където $T = \frac{L_1}{r_1}$ е времеконстантата на първичния контур.

При промяна на тока i_1 във вторичната намотка се индуцира напрежение

$$(5.51) \quad U_2 = M \frac{di_1}{dt},$$

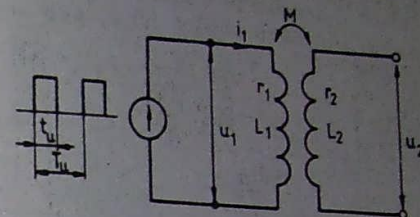
където M е взаимната индуктивност между намотките.

Ще разгледаме два гранични случая:

1. Нека $t_{\text{и}} \gg T$; $T_{\text{и}} \gg T$. Кривите на напреженията u_1 , u_2 и на тока i_1 са показани на фиг. 5.22. Вижда се, че кривата на вторичното напрежение u_2 е силно изкривена. Следователно трансформирането на импулси при $t_{\text{и}} \gg T$ е невъзможно.

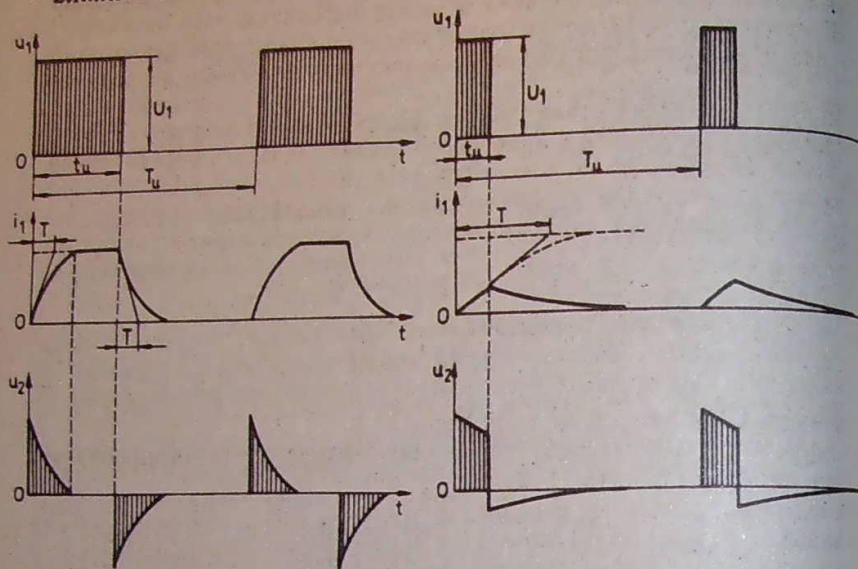
2. Нека $t_{\text{и}} \ll T$; $t_{\text{и}} \ll T_{\text{и}}$. Кривите на u_1 , i_1 и u_2 са показани на фиг. 5.23. В случая импулсите на изхода на трансформатора имат значителни изкривявания. При това отрицателната част от импулса лесно може да бъде отстранена чрез включване на диод във вторичната верига на трансформатора. Следователно при $t_{\text{и}} \ll T$ разглежданият трансформатор може да се използва като импулсен.

Направените разглеждания показват само принципната въз-



Фиг. 5.21. Принципна схема на импулсен трансформатор

можност за трансформиране на еднополярни импулси без особено изкривяване. В действителност електромагнитните процеси в импулсния трансформатор са значително по-сложни поради влиянието на магнитния хистерезис, вихровите токове, паразит-



Фиг. 5.22. Криви на напреженията и токовете на импулсен трансформатор при $t_n > T$; $T_n > T$

Фиг. 5.23. Криви на напреженията и токовете на импулсен трансформатор при $t_n < T$; $T_n < T_n$

ните капацитивни връзки и индуктивното съпротивление на разсейване на трансформатора.

За отслабване на нежелателното влияние на посочените фактори импулсните трансформатори се проектират така, че да работят с линейна магнитна характеристика (линейна зависимост между магнитния поток и намагнитващия ток). Освен това материалът на магнитопровода трябва да има малка остатъчна индукция. Магнитопроводите на импулсните трансформатори се изработват от студеновалцована стомана или желязо-никелови сплави с дебелина на лентата 0,02—0,35 mm. Понякога магнитопроводът се изработва от ферит.

За да се намалят паразитните капацитети и индуктивностите на разсейване на намотките, стремят се те да имат неголям брой навивки. Малката продължителност на импулсите позволява намотките да се изработват от проводник с намалено сечение (приема се повишена плътност на тока), без това да предизвика недопустимо загряване.

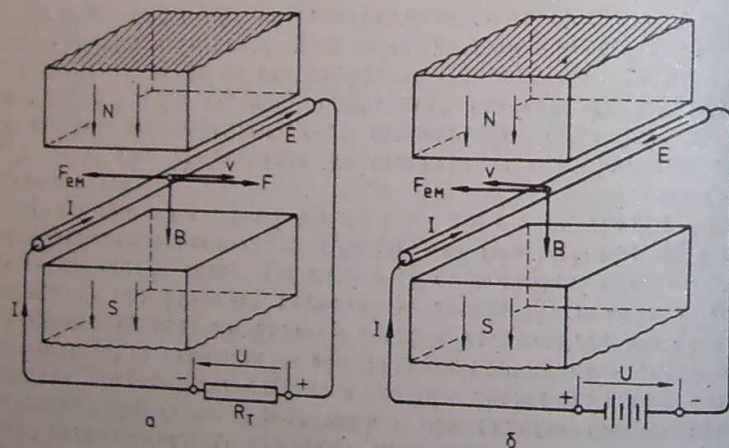
5.10.3. Многонамотъчни еднофазни трансформатори

Многонамотъчните трансформатори с малка мощност се използват за захранване на радиоустройства, електронни уреди, микрокомпютри, схеми на автоматиката и др. Те имат мощности от няколко VA до неколкостотин VA и се изработват за честоти 50—2000 Hz.

Многонамотъчният трансформатор заменя няколко двунамотъчни, той е по-евтин, има по-малки габарити и маса. На ядрото на магнитопровода, обикновено мантиен тип, се поставя една първична и няколко вторични намотки, изпълнени за различни напрежения. За намаляване на смущенията, проникващи от електрическата мрежа, между първичната и вторичните намотки се поставя екранираща намотка, единият край на която се заземява.

6.1. Общи сведения
за електрическите машини

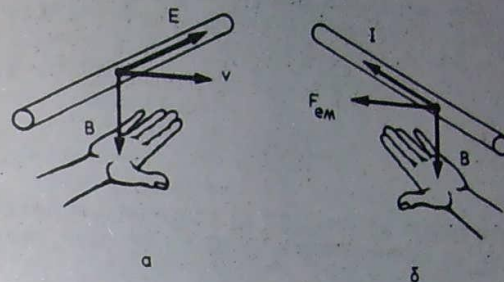
Определение. По определение машина (от гръцката дума μηχανή — оръдие) се нарича такъв енергопреобразуващ механизъм, при който се извършва преместване на частите му една спрямо друга. Машини, в които преобразуването на енергията се извършва вследствие на процеса електромагнитна индукция, се наричат електрически машини.



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

Явлението електромагнитна индукция възниква при изменение на магнитния поток, обхванат от намотките на машината, и се изразява в индукирането на е. д. н. в тях. Това изменение може да стане или вследствие на пространственото преместване на намотката спрямо магнитното поле, или при взаимно неподвижни

в пространството поток и намотка вследствие на изменението във времето на обхванатия от намотката поток, или вследствие на едновременното преместване на намотката спрямо потока и промяната във времето на обхванатия от намотката магнитен поток.



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

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

Нека външна сила F действа върху праволинеен проводник, поставен в магнитно поле с индукция B , и премества този проводник перпендикулярно на магнитните линии със скорост v (фиг. 6.1 а). Тогава съгласно закона за електромагнитната индукция в проводника се индукира е. д. н.

$$(6.1) \quad E = Blv,$$

където l е активната дължина на проводника, т. е. тази негова част, която пресича магнитните линии. Посоката на E се определя с правилото на дясната ръка (фиг. 6.2 а). Ако към краищата на проводника се включи външно товарно съпротивление R_T , през проводника и образувания затворен контур ще премине ток I , съпосочен с E .

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

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

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

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

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

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

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

$$(6.5) \quad E = U + IR,$$

където

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

Умножавайки (6.5) с I , се получава

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

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

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

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

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

След умножаване на (6.7) с I се получава

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

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

Направените разглеждания дават възможност да се направят следните изводи: 1) за всяка електрическа машина е задължително наличието на проводяща среда (проводници) и магнитно поле с възможност за взаимно преместване; 2) както при генераторен, така и при двигателен режим едновременно се наблюдава

индутиране на е. д. н. в проводника и възникване на електромагнитна сила, която действа върху него; 3) всяка електрическа машина може да работи както като генератор, така и като двигател, т. е. електрическите машини имат свойството обратимост.

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

Електрическата машина се състои от две основни части: неподвижен статор 1 и въртящ се цилиндричен ротор 2, разделени с въздушната междина 3. Едната от посочените части на машината е снабдена с елементи, възбуждащи магнитното поле (например електромагнит или постоянен магнит), а другата част има намотка, в която се индутира е. д. н. Както статорът, така и роторът имат магнитопроводи, изработени от магнитно мек материал. Прието е тази част на машината, която възбужда магнитното поле, да се нарича индуктор, а частта, в която се индутира полезното е. д. н. — котва.

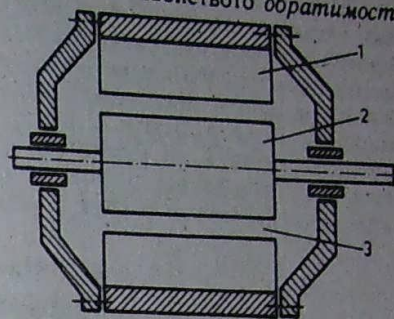
Класификация. Според вида на тока електрическите машини са постояннотокови и променливотокови. Променливотоковите машини са асинхронни, синхронни и колекторни.

Според предназначението си електрическите машини се разделят на: 1) генератори, които преобразуват механична енергия в електрическа; 2) двигатели — преобразуват електрическа енергия в механична; 3) преобразуватели — преобразуват електрическа енергия също в електрическа, но с други параметри.

За всички електрически машини важи принципът на обратимостта, т. е. една машина може да работи както като генератор, така и като двигател или преобразувател, при който може да се променя посоката на преобразуване на енергията.

Според мощността електрическите машини може условно да се разделят на следните групи: до 0,5 kW — микромашини, 0,5—20 kW — машини с малка мощност, 20—250 kW — машини със средна мощност, над 250 kW — машини с голяма мощност.

Номинални данни. Представяват съвкупност от числени стойности на електрически и механични параметри, дадени от производителя и показани на табелката на електрическата машина. Към тях се отнасят номиналните мощност, напрежение, ток, честота на въртене и др., а за променливотоковите машини — 91



Фиг. 6.3. Принципна конструктивна схема на електрическа машина

що номиналната честота и номиналният коефициент на мощността $\cos\phi$. При двигателя номиналната мощност е мощността на неговия вал, а при генератора — отдаваната електрическа мощност.

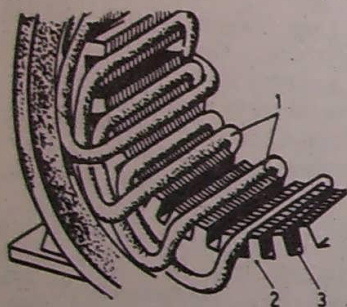
Области на приложение. Електрическите машини се използват главно за генериране на електрическа енергия и за нейното преобразуване в механична енергия. За производство на електрическа енергия почти изключително се използват синхронни генератори, които произвеждат променливотокова енергия с промишлена честота, която у нас е 50 Hz. Най-разнообразни по мощност, честота на въртене и конструкция електрически двигатели се използват широко в промишлеността, селското стопанство, транспорта и бита.

6.2. Намотки на променливотоковите машини

6.2.1. Основни термини и определения

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

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



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

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

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

където

D — вътрешният диаметър на статора;

Z — броят на статорните канали.

в. Полусно деление — дължината на дъгата от вътрешната статорна окръжност, съответстваща на един полюс:

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

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

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

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

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

където m е броят на фазите.

д. Геометрични и електрически градуси. За удобство в теорията на електрическите машини ъглите се изразяват в електрически градуси (ел. °) или в електрически радиани (ел. rad), при което се взема предвид, че едно полюсно деление τ съответствува на 180 ел. ° или на π ел. rad. Тъй като, от друга страна, полюсното деление τ съответствува на $\frac{180^\circ}{p}$ геометрични градуси или на $\frac{\pi}{p}$ геометрични радиани, то

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

където

$\gamma_{\text{геом}}$ — ъгълът, изразен в градуси или радиани;

$\gamma_{\text{ел}}$ — същият ъгъл, изразен в ел. ° или ел. rad;

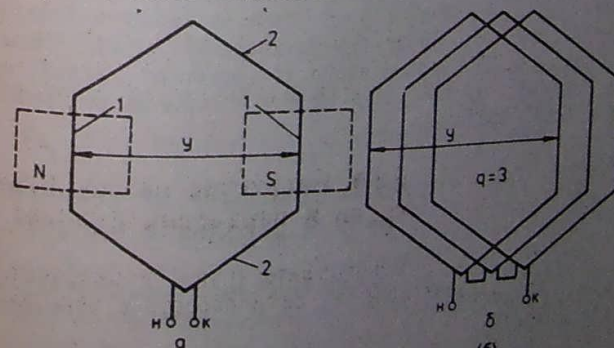
p — броят на двойките полюси.

При липса на специална уговорка ще се приеме, че ъглите са изразени в електрически единици. Например ъгълът между два съседни канала в ел. ° е

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

6.2.2. Елементи на намотката

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



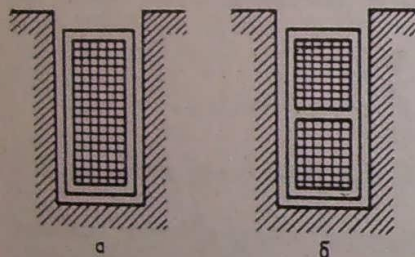
Фиг. 6.5. Секция (а) и секционна група (б)
1 — активни страни; 2 — челни съединения

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

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

6.2.3. Класификация на намотките

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



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

2. Според стъпката на намотката y : 1) с диаметрална стъпка ($y=\tau$); 2) със скъсена стъпка ($y<\tau$); 3) с удължена стъпка ($y>\tau$). Обикновено намотките се изпълняват с диаметрална или със скъсена стъпка.

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

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

6.2.4. Свързване на секционните групи и паралелни клонове

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

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

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

При еднослойните намотки $S = \frac{Z}{2}$ и $L_{\phi} = p$, а при двуслойните — $S = Z$ и $L_{\phi} = 2p$. Следователно, за да се образува намотката помежду си p секционни групи, разместени на 2τ една от друга, а при двуслойната намотка — $2p$ секционни групи, разместени на едно полюсно деление τ .

При последователно свързване на всички секционни групи, принадлежащи на една фаза, броят на паралелните клонове е $a = 1$. Освен последователно секционните групи може да се свържат смесено или паралелно, при което се получава друг брой на паралелните клонове. При еднослойните намотки максималният брой на паралелните клонове е $a_m = p$, а при двуслойните — $a_m = 2p$.

6.2.5. Схеми на променливо-токови намотки

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

Най-простата трифазна еднослойна съсредоточена намотка на двуполюсна машина е показана на фиг. 6.7. Тя се състои от три секции, осите на които са пространствено разместени на 120° , т. е. на $\frac{2}{3}\tau$. Тук всяка секция представлява фазна намотка.

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

— полюсното деление $\tau = \frac{Z}{2p}$;

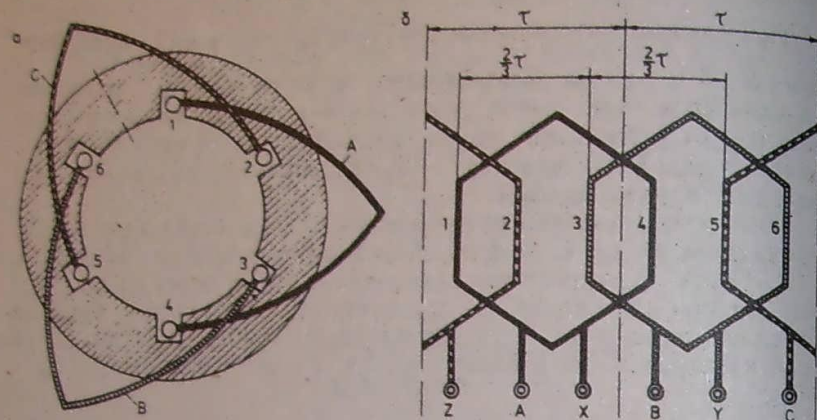
— броят на каналите за полюс и фаза $q = \frac{Z}{2pm}$;

— ъгълът между два съседни канала $\alpha = \frac{360}{Z} p$.

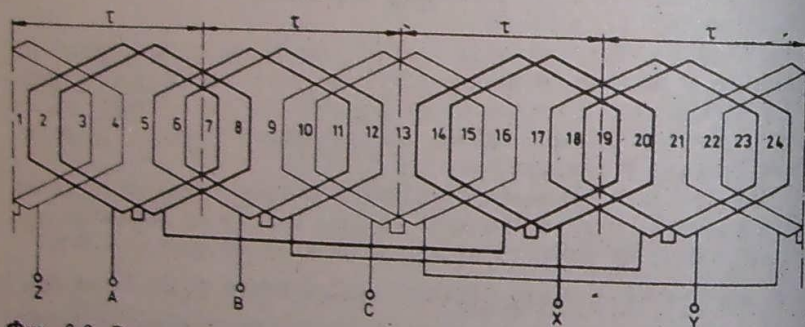
Начертаването на разгънатата схема на еднослойна намотка се извършва в следната последователност:

- начертават се толкова активни страни, колкото е Z ;
- разпределят се активните страни между m -те фази, като се взема предвид, че под един полюс на една фаза принадлежат q канала;

— свързват се активните страни на една фаза, за да се образуват секциите; свързват се секциите, за да се образуват секционните групи; свързват се секционните групи, за да се получи намотката на дадена фаза;



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



Фиг. 6.8. Разгънатата схема на трифазна еднослойна намотка

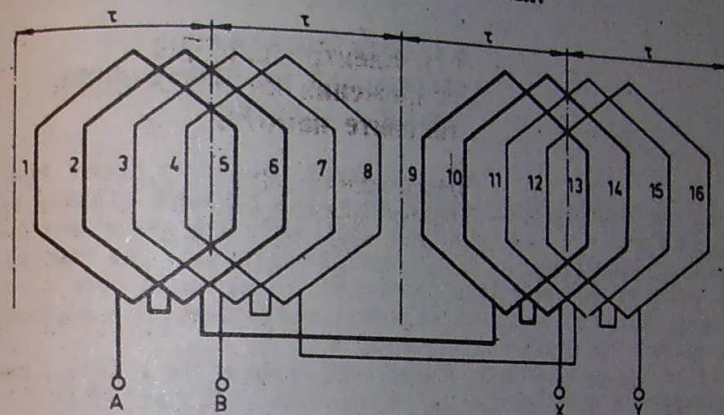
— аналогично се начертават намотките на другите фази, като се отчита обстоятелството, че е. д. н. на m -те фази трябва да образуват симетрична m -фазна система.

На фиг. 6.8 е показана разгънатата схема на трифазна еднослойна намотка със следните данни: $m=3$, $Z=24$, $2p=4$. Изчисляват се: $\tau = \frac{24}{4} = 6$; $q = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$; $\alpha = \frac{360^\circ}{24} \cdot 2 = 30^\circ$.

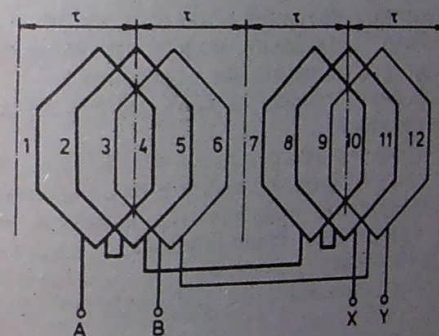
Началото А на първата фаза е в 1-ви канал. Тъй като $\alpha = 30^\circ$, началото В на втората фаза е отместено на 4 канални деления ($4 \cdot 30 = 120^\circ$), т. е. в 5-и канал, и началото С на третата фаза е в 5+4=9-и канал.

На фиг. 6.9 е дадена разгънатата схема на двуфазна едно-

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



Фиг. 6.9. Разгъната схема на двуфазна еднослойна намотка



Фиг. 6.10. Разгъната схема на еднослойна намотка за еднофазна машина

На фиг. 6.10 е показана схемата на еднослойна намотка за еднофазна машина с $2p=4$, $Z=12$. При еднофазните машини е характерно, че освен работната намотка А—Х се поставя и пускова намотка В—У. Работната намотка заема $\frac{2}{3}$ от общия брой канали ($Z_A = \frac{2}{3} \cdot 12 = 8$), а пусковата — $\frac{1}{3}$ от общия брой канали ($Z_B = \frac{1}{3} \cdot 12 = 4$). За двете намотки броят на каналите за

полус и фаза е различен и в разглеждания пример е $q_A = \frac{Z_A}{2p} = \frac{8}{4} = 2$; $q_B = \frac{Z_B}{2p} = \frac{4}{4} = 1$. Полусното деление е $\tau = \frac{12}{4} = 3$.

6.3. Електродвижещи напряжения на променливо- токовите намотки

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

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

(6.16)

$$e_{np} = Blv,$$

където

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

l — активната дължина на проводника;

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

Тъй като $l = \text{const}$ и $v = \text{const}$, то $e_{np} \propto B$, т. е. e_{np} ще се изменя във времето по същия закон, по който е разпределена магнитната индукция във въздушната междина. Ще приемем, че магнитната индукция има синусовидно пространствено разпределение (фиг. 6.11 б). Пространствената координата е x (изразена в единици за дължина) или γ (изразена в ел. рад), като връзката между тях е

(6.17)

$$\gamma = \frac{\pi}{\tau} x,$$

където τ е полусното деление (уравн. 6.10).

Пространствената вълна на магнитната индукция може да се представи във вида

(6.18)

$$B = B_m \cos \gamma = B_m \cos \frac{\pi}{\tau} x,$$

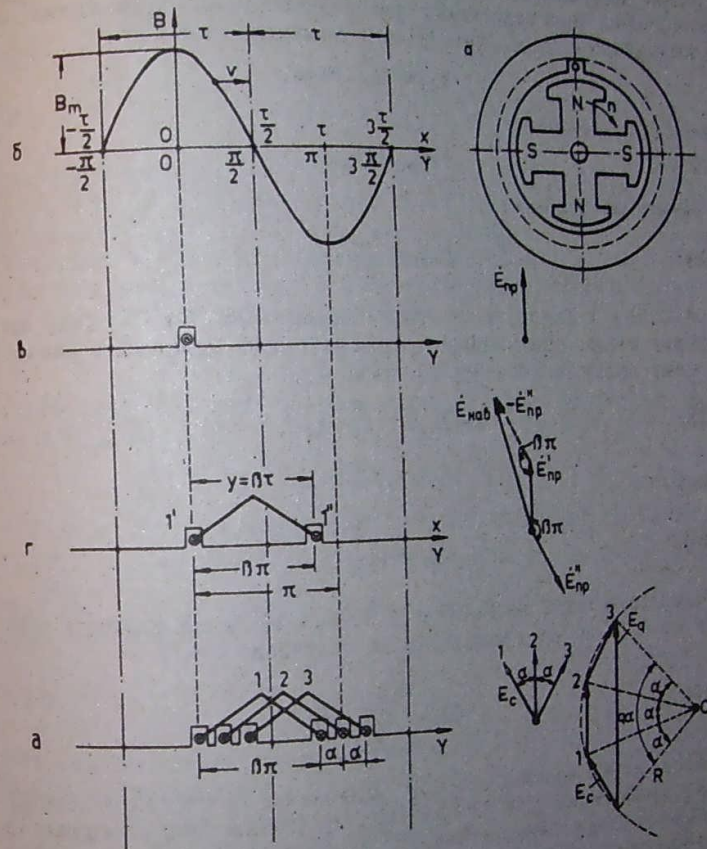
където B_m е нейната амплитуда.

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

(6.19)

$$\Omega = 2\pi n.$$

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



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

(6.20)

$$v = \frac{D}{2} \Omega = \pi D n = 2\tau n.$$

Тъй като за време $T = \frac{1}{f}$, равно на един период на е. д. н., магнитното поле изминава път, равен на 2τ , то

(6.21)

$$v = \frac{2\tau}{T} = 2\tau f.$$

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

$$(6.22) \quad f = p\pi,$$

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

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

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

максимална стойност

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

и ефективна стойност

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

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

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

откъдето

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

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

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

Е. д. н. на навивка и секция. Навивката се състои от два активни проводника $1'$ и $1''$ (фиг. 6.11г). Обикновено намотката се изпълнява със скъсена стъпка, т. е. широчината на навивката y е по-малка от полюсното деление τ , при което относителната стъпка

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

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

Електродвижещите напрежения $\dot{E}'_{\text{пр}}$ и $\dot{E}''_{\text{пр}}$, индукирани в двата активни проводника, са равни по големина, но са дефазирани на ъгъл $\beta\pi$. Е. д. н. на навивката е равна на геометричната разлика от е. д. н. на активните ѝ страни (фиг. 6.11 г);

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

и съгласно фиг. 6.13 г е

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

където

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

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

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

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

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

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

Е. д. н. на секционна група. Секционната група се състои от $q = \frac{Z}{2p\tau}$ секции. На фиг. 6.11д е показана секционна група, която има $q=3$ секции. Е. д. н. на съседните секции са дефазирани на ъгъл

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Като се вземе предвид, че $\omega = \omega_c q N_\Phi$ е броят на последователно свързаните навивки във фаза, и се приеме означението

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

окончателно се получава

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

Тук k_w се нарича коефициент на намотката, който отчита намалението на е. д. н. поради скъсяването и разпределението на намотката.

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

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

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

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

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

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

$$(6.39)$$

$$k_{yv} = \sin v\beta \frac{\pi}{2};$$

$$(6.40)$$

$$k_{qv} = \frac{\sin \frac{vq\pi}{2}}{q \sin \frac{v\pi}{2}};$$

$$(6.41)$$

$$k_{wv} = k_{yv} \cdot k_{qv}.$$

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

Като се отчита казаното, както и предназначението на настоящия учебник, по-нататък се взема предвид само основният хармоник на е. д. н.

6.4. Магнитодвижещи напрежения на променливотоковите намотки

6.4.1. М. д. н. на еднофазна намотка

Преминаващият през променливотоковата намотка ток създава магнитодвижещо напрежение (м. д. н.), което възбужда магнитното поле във въздушната междина.

На фиг. 6.12 а схематично е представена променливотокова машина с еднофазна намотка, която е съсредоточена ($q=1$) и има диаметрална стъпка ($y=\tau$).

Ако ω е общият брой на навивките на намотката, броят на проводниците в канал ще бъде $\frac{\omega}{p}$, където p е броят на двойките полюси.

Нека токът, преминаващ през намотката, се изменя по закона

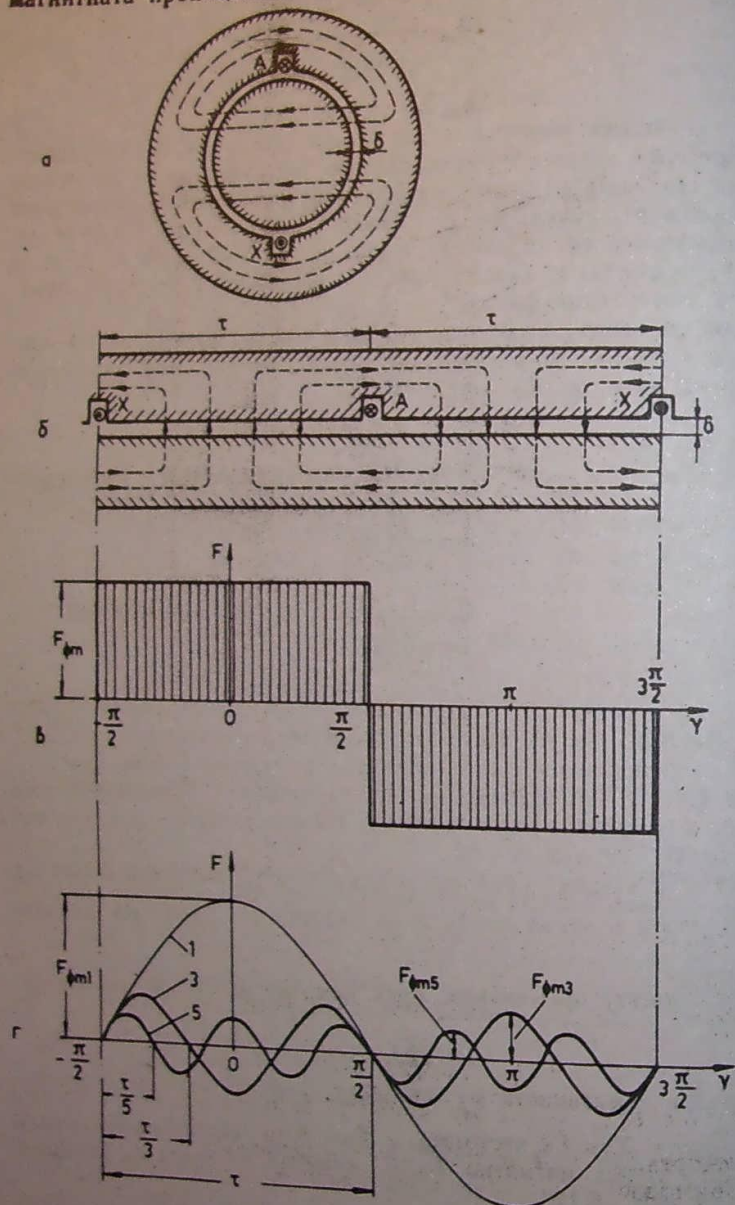
$$(6.42)$$

$$i = \sqrt{2} I \cos \omega t,$$

където I е ефективната му стойност, а $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ — кръговата честота. Тук f е честотата, а T — периодът на променливия ток. Той създава магнитно поле, линиите на което се затварят както на фиг. 6.12.

Да приложим закона за пълния ток $\oint \vec{H} d\vec{l} = \Sigma i$

за затворения контур на една магнитна линия за момента от време, когато токът е максимален, т. е. $i = \sqrt{2} I$. Ако се приеме, че магнитната проницаемост на стоманата е $\mu_c = \infty$, то



Фиг. 6.12. Определяне на м. д. н. на променливотокова намотка

$$2 H_{\delta m} \cdot \delta = \frac{w}{p} \sqrt{2} I,$$

където $H_{\delta m}$ е максималната стойност на интензитета на магнитното поле във въздушната междина δ . За максималната стойност на м. д. н., необходимо за провеждане на магнитния поток през една въздушна междина, се получава

$$(6.43) \quad F_{\phi m} = H_{\delta m} \cdot \delta = \frac{w}{2p} \sqrt{2} I.$$

На фиг. 6.12 б е показана разгънатата схема на машината, а на фиг. 6.12 в — пространственото разпределение на м. д. н., което се представя с правоъгълна крива. Тази крива може да се разцисната ос и спрямо ординатната ос, редът ще съдържа само нечетни косинусови съставки и ще има вида

$$(6.44) \quad F(\gamma) = \sum_{v=1, 3, 5, \dots} F_{\phi m v} \cos v \gamma,$$

където γ е пространствената координата, а v — порядният номер на хармоника. На фиг. 6.12 г са показани хармониците с порядни номера 1, 3, 5.

Съгласно теорията на редовете на Фурие амплитудата на v -тия хармоник е

$$F_{\phi m v} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F_{\phi m} \cos v \gamma d\gamma$$

или за разглежданата симетрична крива

$$(6.45) \quad F_{\phi m v} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_{\phi m} \cos v \gamma d\gamma = \frac{4 F_{\phi m}}{\pi v} \sin v \frac{\pi}{2}.$$

След заместване на (6.43) в (6.45) за амплитудата на v -тия и основния хармоник се получава

$$(6.46) \quad F_{\phi m v} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w}{p v} I \sin v \frac{\pi}{2};$$

$$(6.47) \quad F_{\phi m 1} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w}{p} I.$$

Висшите хармоници на м. д. н. оказват вредно влияние върху работата на машината и за тяхното намаляване се използват разпределени намотки ($q > 1$) със скъсена стъпка ($y < \tau$). В този по-общ случай амплитудите на v -тия и основния хармоник на м. д. н. се определят от изразите

$$(6.48) \quad F_{\phi m v} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w k_{wv}}{p v} I;$$

$$(6.46) \quad F_{\phi m 1} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w k_w}{p} I.$$

където k_{ω} и k_{γ} са коефициентите на намотката за ω -тия и основния хармоник. Те отчитат влиянието на разпределението на намотката и нейното скъсяване и имат същите аналитични изрази както дадените в т. 6.3.

Хармониците на м. д. н. зависят от пространствената координата γ и затова се наричат пространствени хармоници. Тази зависимост от различните хармоници е различна, т. е. хармониците на м. д. н. имат различна периодичност в пространството, която се определя от закона $\cos \gamma$ при приетото на фиг. 6.12 начало на координатната система.

Хармониците на м. д. н. зависят и от времето, тъй като токът през намотката е променлив. Но зависимостта на всички хармоници от времето е еднаква. При изменение на тока съгласно (6.42) всички хармоници на м. д. н. са пропорционални на $\cos \omega t$.

Следователно зависимостите на ω -тия и на основния хармоник на м. д. н. от времето t и пространствената координата γ имат вида

$$(6.50) \quad F_{\phi \omega}(t, \gamma) = F_{\phi \omega} \cos \omega t \cos \gamma;$$

$$(6.51) \quad F_{\phi 1}(t, \gamma) = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \gamma.$$

От (6.48) следва, че амплитудата на хармониците се намалява при увеличаване на поредния им номер. Освен това за намаляване на влиянието на висшите хармоници допринасят скъсяването и разпределението на намотката. Тъй като за работата на машината главно значение има основният хармоник на м. д. н., по-натък ще се разглежда само той.

6.4.2. Пулсиращи и въртящи се вълни на м. д. н.

Уравнение (6.51) дава възможност да се определи стойността на м. д. н. в произволна точка в пространството в произволен момент от времето. То представлява уравнение на пулсираща вълна, която е разпределена в пространството по синусоиден закон и пулсира във времето също по синусоиден закон (фиг. 6.13).

Следователно м. д. н. на еднофазната намотка представлява пулсираща вълна. При $\delta = \text{const}$ магнитната индукция е пропорционална на м. д. н. Оттук следва, че една фаза или една еднофазна намотка възбужда пулсиращо магнитно поле.

Като се използва известната от тригонометрията зависимост, изразът (6.51) може да се представи във вида

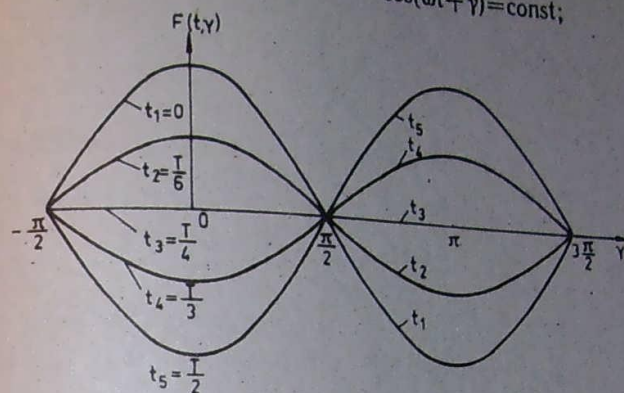
$$(6.52) \quad F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \gamma = \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos (\omega t + \gamma).$$

Двата члена в дясната част на равенството представляват въртящи се вълни на м. д. н., разпределени в пространството по

синусоиден закон, с амплитуди $\frac{1}{2} F_{\phi 1}$. Действително нека си представим, че наблюдаваме дадени точки от тези вълни с постоянни стойности на м. д. н. За тези точки може да се запише

$$\cos (\omega t - \gamma) = \text{const};$$

$$\cos (\omega t + \gamma) = \text{const};$$



Фиг. 6.13. Пулсираща вълна на м. д. н.

или

$$\omega t - \gamma = \text{const};$$

$$\omega t + \gamma = \text{const}.$$

След диференциране спрямо времето t се получава

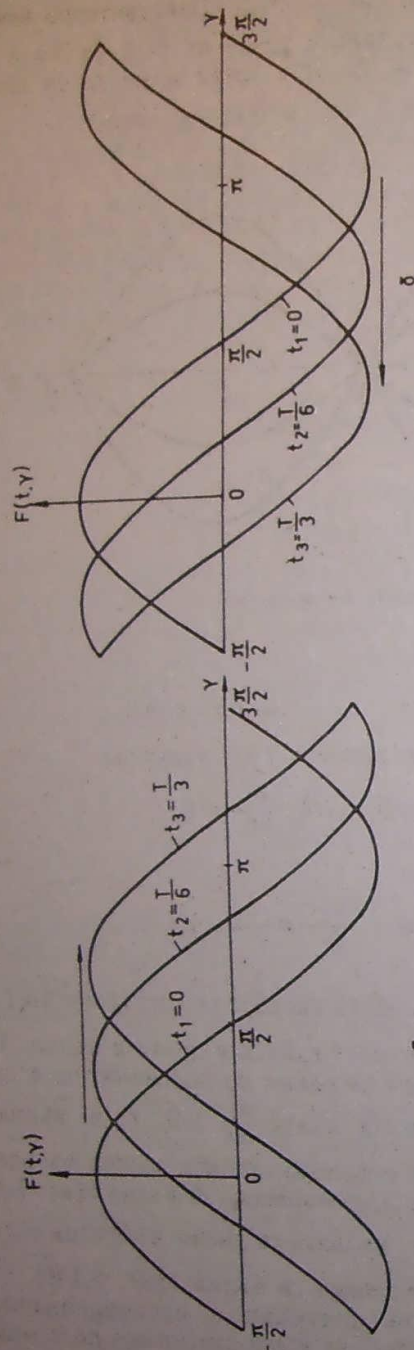
$$\omega - \frac{d\gamma}{dt} = 0; \quad \omega + \frac{d\gamma}{dt} = 0,$$

откъдето

$$(6.53) \quad \frac{d\gamma}{dt} = \omega; \quad \frac{d\gamma}{dt} = -\omega.$$

Тук $\frac{d\gamma}{dt}$ представлява ъгловата скорост (в електрически радиани за секунда), с която се въртят едната и другата вълна. Ъгловите скорости на двете вълни са равни по големина, но с противоположни посоки. За първата вълна $\frac{d\gamma}{dt} > 0$, т. е. вълната се движи в посока, съвпадаща с положителната посока на координатата γ , и затова се нарича *правовъртяща се вълна* (фиг. 7.14 а). За втората вълна $\frac{d\gamma}{dt} < 0$, т. е. вълната се движи в обратна посока и затова се нарича *обратновъртяща се вълна* (фиг. 6.14б).

При $\delta = \text{const}$ магнитната индукция е пропорционална на м. д. н. Тогава от (6.52) следва, че всяко пулсиращо поле може да



Фиг. 6.14. Въртящи се вълни на м. д. н. а — правовъртяща се; б — обратновъртяща се

се разложи на две въртящи се полета, които се въртят с еднакви скорости в противоположни посоки и имат амплитуди, равни на половината от амплитудата на пулсиращото поле.

Ъгловата скорост, с която се върти всяко от полетата в rad.s^{-1} , е

$$(6.54) \quad \Omega_1 = \frac{\Omega}{p} = \frac{2\pi f}{p} = 2\pi n_1.$$

Тук

$$(6.55) \quad n_1 = \frac{f}{p}$$

е честотата на въртене на въртящото се магнитно поле или синхронната честота на въртене, изразена в s^{-1} . Синхронната честота на въртене, изразена в min^{-1} , е

$$(6.56) \quad n_1 = \frac{60 f}{p}.$$

При $f=50 \text{ Hz}$ се получава $n_1 = \frac{3000}{p} \text{ min}^{-1}$, т. е. при $p=1$; 2; 3; 4 съответно $n_1=3000$; 1500; 1000; 750 min^{-1} .

6.4.3. М. д. н. на двуфазна намотка

За получаване на въртящо се магнитно поле е необходимо намотките на машината да създадат няколко потока (минимум два), разместени в пространството и дефазирани във времето.

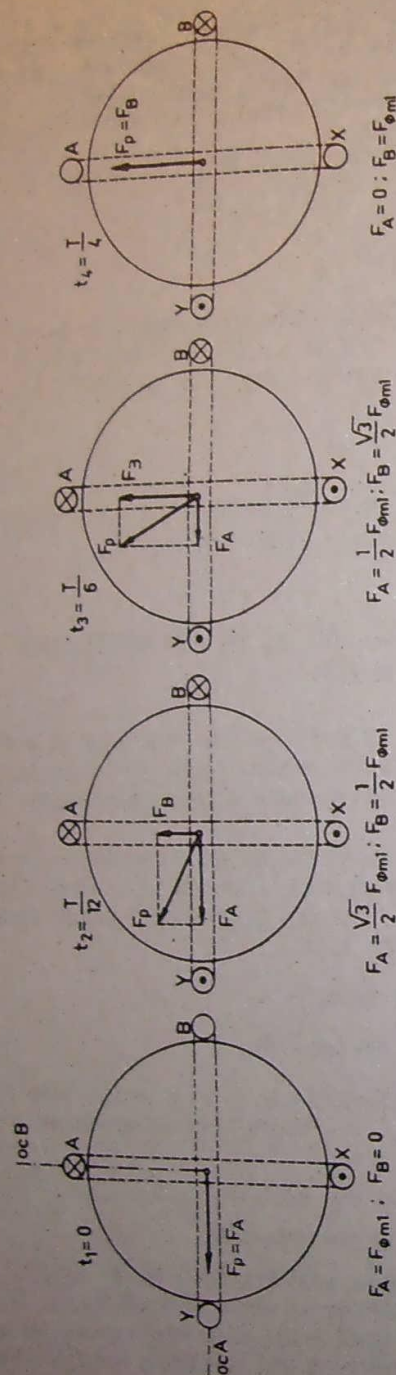
На фиг. 6.15 е показана схематично двуфазна машина. Приема се, че двете фази А и В са разместени в пространството на 90° ел., имат еднакъв брой навивки и през тях преминават равни токове, дефазирани помежду си на 90° , т. е.

$$(6.57) \quad \begin{cases} i_A = \sqrt{2} I \cos \omega t; \\ i_B = \sqrt{2} I \cos (\omega t - 90^\circ). \end{cases}$$

Всяка от фазите създава пулсиращо м. д. н. с амплитуда $F_{\phi m1}$, а моментните стойности на м. д. н., които действуват по осите на намотките, са

$$(6.58) \quad \begin{cases} F_A(t) = F_{\phi m1} \cos \omega t; \\ F_B(t) = F_{\phi m1} \cos (\omega t - 90^\circ). \end{cases}$$

Геометричната им сума определя резултатното м. д. н. F_r . Разглеждаме м. д. н. в различни моменти от времето t_1, t_2, t_3 , а и т. н., както е показано на фиг. 6.15. За всеки момент от времето по (6.58) се определят двете м. д. н., които се изобразяват с



Фиг. 6.15. Получаване на въртящо се м. д. н. при двуфазна машина

вектори, насочени по осите на съответните намотки, и чрез геометричното им сумиране се получава резултатното м. д. н. F_p . Може да се направят следните изводи:

1. Резултатното м. д. н. се върти с постоянна ъглова скорост (за равни интервали от време векторът, изобразяващ резултатното м. д. н., се завърта на равни ъгли).
2. Резултатното м. д. н. има постоянна амплитуда $F_p = F_{\phi m1} = F_{m1}$.

3. Резултатното м. д. н. е насочено по оста на тази фаза, в която в дадения момент от времето токът е максимален.

При $\delta = \text{const}$ казаното за м. д. н. важи и за магнитната индукция, т. е. при разглежданите изходни предпоставки векторът на резултатната магнитна индукция се върти с постоянна ъглова скорост, има постоянна амплитуда и при двуполусна машина за един период T на тока върхът на вектора ще опише окръжност. Такова поле се нарича кръгово въртящо се магнитно поле.

Същото може да се докаже и като се използват аналитичните изрази за м. д. н. на двете фази на базата на (6.51):

$$(6.59) \quad \begin{cases} F_A(t, \gamma) = F_{\phi m1} \cos \omega t \cos \gamma; \\ F_B(t, \gamma) = F_{\phi m1} \cos (\omega t - 90) \cos (\gamma - 90). \end{cases}$$

Разлагаме пулсиращите вълни на право- и обратновъртящи се вълни:

$$(6.60) \quad \begin{cases} F_A(t, \gamma) = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t + \gamma); \\ F_B(t, \gamma) = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t + \gamma - 180). \end{cases}$$

Сумата от обратновъртящите се вълни е равна на нула и затова резултатното м. д. н. ще бъде

$$(6.61) \quad F_p(t, \gamma) = F_A(t, \gamma) + F_B(t, \gamma) = 2 \cdot \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) = F_{m1} \cos (\omega t - \gamma).$$

Вижда се, че се получава кръгово правовъртящо се м. д. н. чиято честота на въртене е $n_1 = \frac{f}{p}$ и има амплитуда

$$(6.62) \quad F_{m1} = F_{\phi m1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega k_w}{p} I.$$

От изложеното следва, че за получаване на кръгово въртящо се магнитно поле в двуфазните машини е необходимо да бъдат изпълнени три условия: осите на двете намотки да са разменени на 90° в пространството, двата тока да са дефазирани

във времето на 90° , двете м. д. н. и създадените от тях потоци да са равни.

Посоката на въртене на полето може да се промени, като се разменят началото и краят на една от фазните намотки.

При неизпълнение на кое да е от посочените условия се получава елиптично въртящо се магнитно поле. При него векторът на резултатната магнитна индукция се върти неравномерно и върхът му описва елипса. Елиптичното поле може да се разглежда като сума от две неравни по големина кръгови полета, които се въртят в противоположни посоки с еднакви честоти на въртене. Обратновъртящото се магнитно поле влошава технико-икономическите показатели на машината и затова стремежът е да се получи кръгово поле.

В частния случай, когато амплитудите на право- и обратновъртящото се магнитно поле са равни, се получава пулсиращо магнитно поле.

6.4.4. М. д. н. на трифазна намотка

Нека трите фазни намотки, чиито оси са пространствено разместени на 120° , да бъдат захранени със симетрична система токове, т. е.

$$(6.63) \quad \begin{cases} i_A = \sqrt{2} I \cos \omega t; \\ i_B = \sqrt{2} I \cos (\omega t - 120); \\ i_C = \sqrt{2} I \cos (\omega t - 240). \end{cases}$$

Ако се избере началото на координатната система по оста на фаза А, за м. д. н. на трите фази може да се запише

$$(6.64) \quad \begin{cases} F_A(t, \gamma) = F_{\phi m1} \cos \omega t \cos \gamma \\ F_B(t, \gamma) = F_{\phi m1} \cos (\omega t - 120) \cos (\gamma - 120); \\ F_C(t, \gamma) = F_{\phi m1} \cos (\omega t - 240) \cos (\gamma - 240). \end{cases}$$

Разлагаме ги на право- и обратновъртящи се вълни:

$$(6.65) \quad \begin{cases} F_A(t, \gamma) = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t + \gamma - 0.240); \\ F_B(t, \gamma) = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t + \gamma - 1.240); \\ F_C(t, \gamma) = \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) + \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t + \gamma - 2.240). \end{cases}$$

Сумата от обратновъртящите се вълни е равна на нула и затова резултатното м. д. н. ще бъде

$$(6.66) \quad F_p(t, \gamma) = F_A(t, \gamma) + F_B(t, \gamma) + F_C(t, \gamma) = 3 \frac{1}{2} F_{\phi m1} \cos (\omega t - \gamma) = F_{m1} \cos (\omega t - \gamma).$$

Вижда се, че при посочените условия трафазната намотка възбужда кръгово въртящо се м. д. н. с постоянна честота на въртене $n_1 = \frac{f}{p}$ и амплитуда

$$(6.67) \quad F_{m1} = \frac{3}{2} F_{\phi m1} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega k_w}{p} I.$$

Полето се върти в посоката на редуване на фазите. За да се промени посоката на въртене на полето, трябва да се превключат две от фазите.

От (6.62) и (6.67) следва, че в общ случай при захранване на една симетрична m -фазна намотка със симетрична m -фазна система токове се възбужда кръгово въртящо се м. д. н. с амплитуда

$$(6.68) \quad F_{m1} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{\omega k_w}{p} I.$$

При $\delta = \text{const}$ посочените условия за получаване на кръгово въртящо се м. д. н. са и условия за получаване на кръгово въртящо се магнитно поле. При несиметрия в намотката или в токовете се получава елиптично въртящо се поле.

7 | Асинхронни двигатели

7.1. Предназначение и област на приложение. Устройство

Асинхронните двигатели са основни преобразуватели на електрическа енергия в механична. Те се използват в повечето електрозадвижвания и намират приложение във всички области на народното стопанство. Асинхронните двигатели са около 90% от всички електродвигатели и консумират над 40% от произведената електрическа енергия. Такова всеобщо приложение се обяснява с изключително умело съчетание на експлоатационни и конструктивни характеристики. Предимства на асинхронните двигатели са относително простата и евтина конструкция, голямата експлоатационна надеждност, минималното обслужване, високият к. п. д., добрата претоварваща способност и др.

Голямото търсене на асинхронни двигатели е предизвикало масовото производство на серии електродвигатели с общо предназначение. *Серия* се нарича ред от електродвигатели с нарастваща номинална мощност и еднакво номинално напрежение, изпълнени с различни номинални честоти на въртене. Освен двигатели с общо предназначение произвеждат се и специални асинхронни двигатели.

В зависимост от вида на роторната намотка асинхронните двигатели са с накъсосъединен (кафезен) ротор и с навит ротор.

Преобладаващо приложение в промишлеността имат *трифазните* асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор. Те се произвеждат в широк диапазон на номиналната мощност: от няколко киловата до няколко мегавата. Номиналното напрежение на трифазните асинхронни двигатели обикновено е 380 V. Двигателите с мощност, по-голяма от 200 kW, се изпълняват за високо напрежение — с номинално напрежение 6 kV и 10 kV. Асинхронните двигатели с навит ротор се използват много по-рядко от двигателите с кафезен ротор. Те имат по-сложна конструкция и по-висока цена. Намират приложение в следните случаи: когато е необходимо регулиране на честотата на въртене в относително

малки граници: когато е необходим голям пусков момент при сравнително малък пусков ток; когато пускането е продължително и може да доведе до недопустимо загряване на роторната намотка.

Еднофазните асинхронни двигатели се произвеждат само за малки мощности — от няколко вата до около един киловат. Те се използват за задвижване на вентилатори и помпи, в устройствата на автоматиката и приборостроенето, в битовото машиностроене и др.

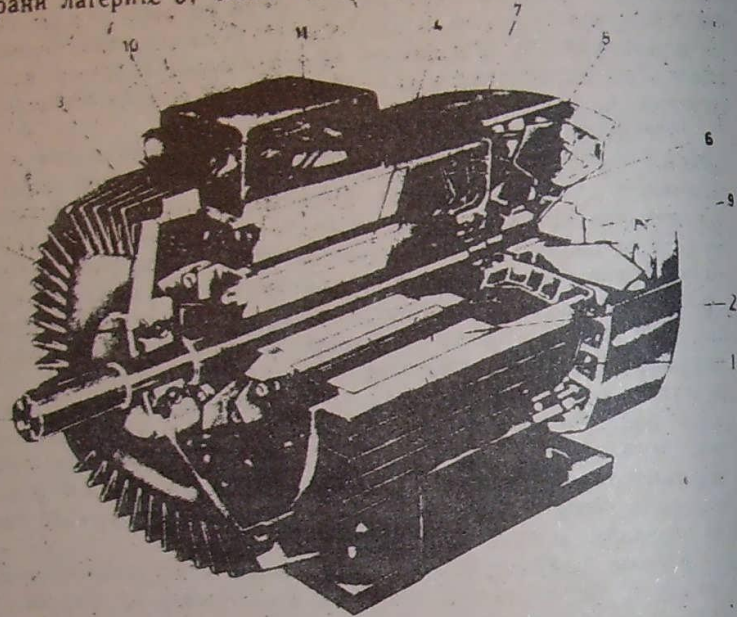
Честотата на въртене на ротора на асинхронния двигател при дадена честота на електрическата мрежа се изменя малко в зависимост от натоварването. Повечето асинхронни двигатели се използват за задвижване на механизми, които не изискват регулиране на честотата на въртене. При редица работни машини регулирането на честотата на въртене намалява разхода на електроенергия, подобрява параметрите и качеството на задвижването. Затова съществува тенденция за увеличаване на частта на регулируемите задвижвания с асинхронни двигатели. В това отношение най-голям ръст имат системите с полупроводников преобразувател на честота (инвертор), който захранва асинхронен двигател с кафезен ротор. Тази безконтактна система позволява плавно регулиране на честотата на въртене в широки граници. В редица задвижвания тя замества колекторните двигатели с малка и средна мощност.

Важна характеристика, определяща конструктивното изпълнение на асинхронния двигател, е *степената на защита*, която зависи от възможността за проникване на вода и твърди тела във вътрешността на машината и от начина за предпазване на обслужващия персонал от допир с тоководещи и въртящи се части. Степента на защита е свързана със системата на вентилация и вида на охлаждане на двигателите.

В световната практика са се наложили две основни степени на защита. Съгласно международните норми техните означения са IP23 и IP44. Първата от тях характеризира машините със защита IP23 и втората — двигателите със защита IP44. При двигателите със степен на защита IP23 околният въздух навлиза във вътрешността на машината, отнема топлина от активните части и се изхвърля навън. При степен на защита IP44 вътрешният въздух е напълно отделен от околния. Охлаждането на машината се осъществява чрез обдухване на външната и повърхност. За работата в прашни и влажни помещения се изработват и двигатели с по-висока степен на защита. Изследванията показват, че при еднакви други условия закритите двигатели имат по-голяма надеждност от защитените.

На фиг. 7.1 е показано устройството на асинхронен двигател с малка мощност и степен на защита IP44. Неподвижната част на двигателя (*статорът*) се състои от следните елементи: тяло 1,

статорен пакет 2 и статорна намотка 3. Въртящата се част (роторът) се състои от роторен пакет 4, нахъсосъединена роторна намотка и вал 5. За да може да се върти роторът, върху вала са монтирани лагерите 6, чиито външни гривни са разположени в

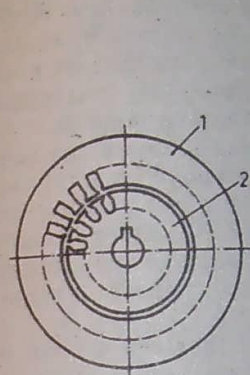


Фиг. 7.1. Устройство на асинхронен двигател с нахъсосъединен ротор
1 — тяло, 2 — статорен пакет, 3 — статорна намотка, 4 — роторен пакет,
5 — вал, 6 — лагери, 7 — лагерни щитове, 8 — вентилатор, 10 — клемна
кутия, 11 — клемно табло

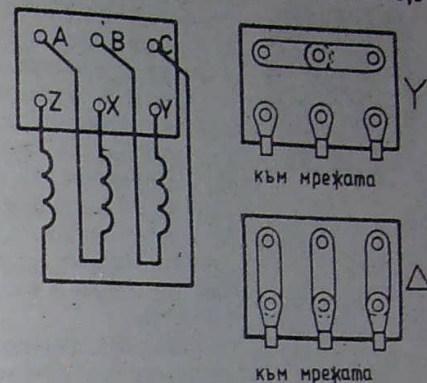
гнезда на лагерни щитове 7. Лагерните щитове се присъединяват от двете страни на тялото с болтове и затварят вътрешността на машината. Вентилаторът 8 е монтиран върху вала и охлажда двигателя, като духа въздух между надлъжните ребра на тялото. Той е защитен с вентилаторен кожух 9. Изводите на статорната намотка са свързани към клемно табло 11, разположено върху тялото. То е защитено чрез клемна кутия 10. Изводите на статорната намотка се свързват с мрежата, затова тя се нарича първична (индекс 1).

Тялото е основен конструктивен елемент на двигателя. То дава механичната якост на цялата конструкция. Чрез лапите му машината се захваща за фундамента. Тялото на двигателите с малка мощност се отлива от алуминий, а на двигателите с малка и средна мощност — от чугун. При големи мощности тялото се изработва във вид на заварена от стомана конструкция.

Статорният пакет е част от магнитната система на асинхронния двигател. Магнитният поток в пакета е променлив. За да се намалят загубите от вихрови токове, статорният пакет се набира от отделни листове електротехническа стомана с дебелина 0,5



Фиг. 7.2. Статорен (1) и роторен (2) лист на асинхронен двигател



Фиг. 7.3. Клемно табло на трифазна намотка и свързване в звезда и триъгълник

mm. Тя е легирана със силиций, за да се увеличи електрическото ѝ съпротивление. Това предизвиква намаляване на загубите от хистерезис и вихрови токове.

Статорните и роторните листове са изработени чрез шанцоване (фиг. 7.2). Формата на листовите е такава, че след набирането на пакетите се получават равномерно разпределени статорни и роторни канали и зъби. В съответните канали са разположени статорната и роторната намотка.

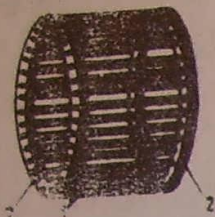
Статорната намотка е трифазна, еднослойна или двуслойна. Секциите на намотката са изработени от изолирани проводници с кръгло или правоъгълно напречно сечение. Те са изолирани от стените на статорните канали с подходяща изолация, чиито вид и дебелина зависят от номиналното напрежение.

Шестте извода на трифазната статорна намотка са изведени на клемно табло (фиг. 7.3 а), което дава възможност намотката да се свърже в звезда или в триъгълник (фиг. 7.3 б).

Роторният пакет също е набран от отделни листове електротехническа стомана. Той е закрепен към вала с шпонка или катка, така че да може да се предава моментът на двигателя.

Нахъсосъединената роторна намотка на двигателя е изведена на клемно табло (фиг. 7.3 а), което дава възможност намотката да се свърже в звезда или в триъгълник (фиг. 7.3 б). Разтопенният метал ка и средна мощност се отлива от алуминий. Разтопенният метал запълва роторните канали, където се образуват роторните пръчки. Едновременно с пръчките се отливат двата пръстена и вентилаторните перки върху тях (фиг. 7.1). По такъв начин се получава

кафезната роторна намотка, в която пръчките са свързани нахъсо чрез пръстените (фиг. 7.4). При двигателите с голяма мощност нахъсоединената роторна намотка има заварена конструкция и се изработва от мед или медни сплави. Роторната намотка се нарича още *вторична* (индекс 2).



Фиг. 7.4. Нахъсо-соединена (кафез-на) роторна намотка
1 — пръчки, 2 — пръстени

В роторните канали на асинхронния двигател с навит (фазов) ротор се полага трифазна намотка от изолирани секции, която има брой на полюсите, еднакъв с броя на статорната намотка. Изводите на роторната намотка, която е свързана в звезда, са свързани с три контактни пръстена. Те са монтирани върху вала, така че са изолирани от него и помежду си. Чрез контактните пръстени и четков апарат изводите на въртящата се роторна намотка са изведени навън и могат да се свързват с външна верига.

Валът на асинхронния двигател служи за монтиране на всички въртящи се детайли на ротора. Чрез свободния край на вала двигателят се свързва със задвижваната машина посредством съединител или предавка (зъбна или ремъчна).

Детайлите на асинхронния двигател се изработват така, че да се осигури равномерна въздушна междина между статора и ротора. Въздушната междина δ оказва съществено влияние върху характеристиките на двигателя. Намагнитващият ток, необходим за възбуждане на основния магнитен поток, е толкова по-малък, колкото по-малка е въздушната междина. Поради това асинхронните двигатели се проектират с минимална въздушна междина, чиято стойност се ограничава от механични съображения.

7.2. Принцип на работа на трифазния асинхронен двигател

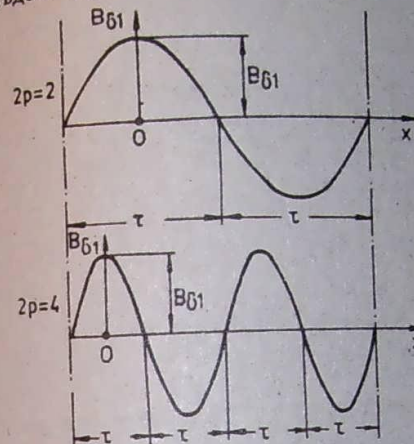
Следващото разглеждане се отнася за асинхронен двигател със симетрична трифазна статорна намотка, включена към мрежа с трифазна симетрична система напрежения. Освен това се смята, че магнитното поле съдържа само основния хармоник. В 6.4.4 е показано, че едновременно магнитно действие на трифазна симетрична система токове в трифазна симетрична намотка предизвиква появата на кръгово въртящо се м. д. н.

$$(7.1) \quad F_1(t, \gamma) = F_{m1} \cos(\omega t - \gamma).$$

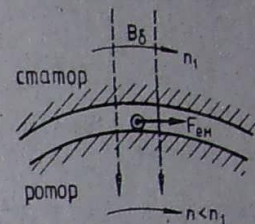
При $\omega = 2\pi f_1 = \text{const}$ това м. д. н. се върти с постоянна честота (синхронната честота на въртене)

$$(7.2) \quad n_1 = \frac{f_1}{p}, \text{ s}^{-1} \text{ или } n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \text{ min}^{-1},$$

където f_1 е честотата на мрежата.



Фиг. 7.5. Магнитна индукция във въздушната междина при двуполусна и четириполусна статорна намотка



Фиг. 7.6. Обяснение на принципа на работа на асинхронния двигател

По-нататък се приема, че въздушната междина между статора и ротора е равномерна ($\delta = \text{const}$), а магнитната проникателност на стоманата $\mu_c = \infty$, т. е. пренебрегва се магнитното съпротивление на феромагнитните участъци от магнитната верига. Тогава магнитната индукция във въздушната междина, възбудена от токовете в статорната намотка, е

$$(7.3) \quad b_{\delta 1}(t, \gamma) = \lambda_{\delta} F_1(t, \gamma) = B_{\delta 1} \cos(\omega t - \gamma).$$

В последното уравнение λ_{δ} е специфичната магнитна проводимост на въздушната междина:

$$(7.4) \quad \lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta}.$$

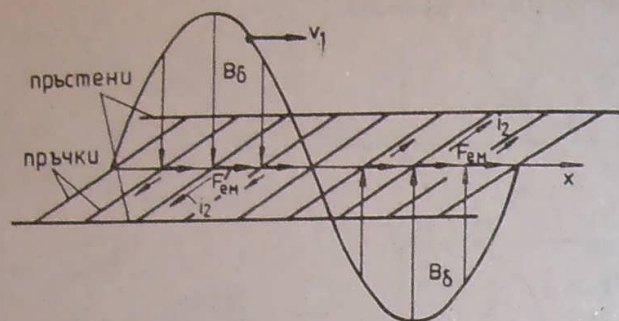
От (7.3) се вижда, че магнитната индукция във въздушната междина има синусоидно пространствено разпределение и се върти с честота n_1 . За момента $t=0$ от (6.17) и (7.3) се получава

$$(7.5) \quad b_{\delta 1}(x) = B_{\delta 1} \cos \frac{\pi}{\tau} x.$$

Графики на зависимостта $b_{\delta 1}(x)$ са представени на фиг. 7.5 за случаите на двуполусна ($2p=2$) и четириполусна ($2p=4$) ста-

торна намотка. По периферията на въздушната междина магнитната индукция има толкова полуълни, колкото е броят на полюсите на статорната намотка $2p$.

Когато вълната на магнитната индукция се премества спрямо проводниците на роторната намотка, в тях се индутира е. д. н.



Фиг. 7.7. Електромагнитни сили в проводниците на ротора

Посоката на е. д. н. се определя с помощта на правилото на дясната ръка. При това трябва да се има предвид, че в случая посоката на *релативното движение* на проводника е обратна на посоката, в която се премества вълната на магнитната индукция.

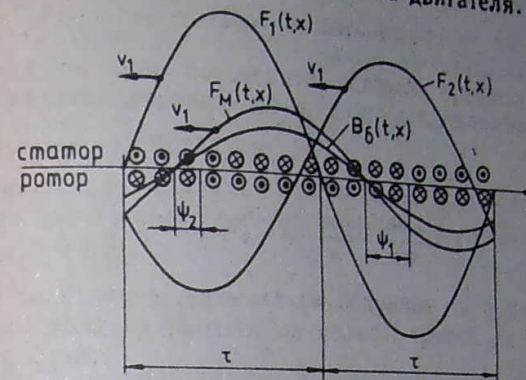
На фиг. 7.6 е показан един проводник от роторната намотка. Магнитното поле във въздушната междина се върти отляво надясно с честота на въртене n_1 . Приема се, че роторът се върти в същата посока с честота на въртене n , по-малка от n_1 . Тогава релативното движение на проводника спрямо полето е в обратна посока — отляво наляво. Относителната честота на въртене между ротора и въртящото поле е

$$(7.6) \quad n_2 = n_1 - n.$$

Посоката на индутираното е. д. н. според правилото на дясната ръка е от плоскостта на чертежа към нас. Ако токът в проводника i_2 е във фаза с е. д. н., той ще има същата посока. Взаимодействието на тока с магнитното поле поражда електромагнитна сила $F_{ем}$. Нейната посока, определена с помощта на правилото на лявата ръка, съвпада с посоката на въртене на полето.

За да се осъществи електромеханично преобразуване на енергията, силите в проводниците на ротора трябва да имат еднаква посока (фиг. 7.7). Тези сили създават електромагнитен момент, под действието на който роторът се върти с честота n , близка до n_1 . Роторът обаче не достига въртящото се магнитно поле, защото в такъв случай би се получило $n_2 = 0$. Тогава в проводниците на роторната намотка няма да се индутира е. д. н., вследствие на което токът и електромагнитните сили ще се анулират. От напра-

веното допускане $n < n_1$ следва, че роторът на асинхронния двигател се върти по-бавно от магнитното поле. Само тогава се създава електромагнитен момент. От *асинхронното въртене* на ротора и полето произхожда названието на двигателя.



Фиг. 7.8. Получаване на резултатно магнитно поле във въздушната междина

Относителната разлика между честотите на въртене на магнитното поле и на ротора

(7.7)

$$s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

се нарича *хлъзгане*. Хлъзгането се изразява и в проценти:

(7.8)

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100, \%$$

В момента на включване на двигателя към мрежата роторът е неподвижен ($n=0$), а хлъзгането $s=1$. Другият граничен случай е $n=n_1$ ($s=0$), когато електромагнитният момент става равен на нула. Следователно при работа на асинхронната машина като двигател са валидни неравенствата $0 < n < n_1$ и $1 > s > 0$. При номинален режим хлъзгането s_n е малко. Например за четириполюсен асинхронен двигател с мощност 15 kW при захранване от мрежа с $f_1 = 50$ Hz от (7.2) и (7.7) се получава

$$n_1 = 1500 \text{ min}^{-1}; \quad n_n = 1450 \text{ min}^{-1}; \\ s_n = 0,033 \text{ или } 3,33\%.$$

Честотата на е. д. н. и на токовете в роторната намотка f_2 е пропорционална на *релативната честота* на въртене n_2 . Връз-

ката между тези две величини се записва чрез уравнение, подобно на (7.2):

$$(7.9) \quad f_2 = p n_2 \cdot p(n_1 - n).$$

Честотата на роторните токове може да се изрази чрез хлъзгането s и честотата на мрежата f_1 :

$$(7.10) \quad f_2 = \frac{p n_1 (n_1 - n)}{n_1} = s f_1.$$

Многофазният ток в роторната намотка възбужда кръгово въртящо се м. д. н. То се върти спрямо ротора с честота на въртене

$$(7.11) \quad n_{2p} = \frac{f_2}{p} = \frac{s f_1}{p} = s n_1.$$

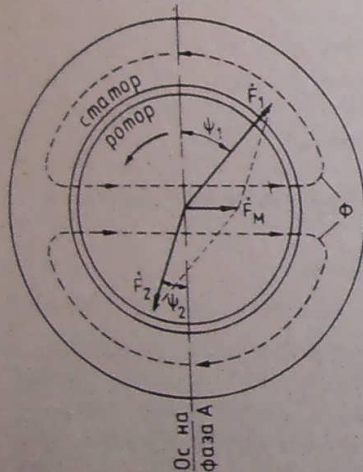
Роторът се върти в същата посока с честота на въртене n . Тогава роторното м. д. н. се върти спрямо неподвижния статор с

$$(7.12) \quad n_{2c} = n_{2p} + n = s n_1 + n_1(1 - s) = n_1.$$

Последното уравнение показва, че пространствените вълни на статорното м. д. н. $F_1(t, x)$ и роторното м. д. н. $F_2(t, x)$ се въртят в една и съща посока с еднаква честота на въртене n_1 . Тези м. д. н. имат еднакъв брой на полюсите, сумират се и образуват резултатно м. д. н.

$$(7.13) \quad F_M(t, x) = F_1(t, x) + F_2(t, x).$$

От направения анализ следва, че едновременното действие на токовете в статорната и роторната намотка се изразява във възникването на резултатно м. д. н. (фиг. 7.8). То възбужда резултатния въртящ се магнитен поток при работа на двигателя. Следователно кривата на магнитната индукция $B_d(t, x)$ на резултатното магнитно поле във въздушната междина във всеки момент заема същото пространствено



Фиг. 7.9. Пространствена векторна диаграма на асинхронен двигател

но положение както кривата на резултатното м. д. н. $F_M(t, x)$.

Много по-удобно е м. д. н. да се представят с пространствени вектори вместо с пространствени вълни, както е направено на фиг. 7.9 за двуполусен двигател. Тогава (7.13) може да се запише във вида

(7.14)

$$\vec{F}_M = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Тъй като при $p=1$ електрическите и геометричните ъгли са равни (вж. 6.2.1), векторната диаграма на фиг. 7.9 може да се разглежда като пространствена и като времева. На същата фигура са показани две от магнитните линии на резултатния магнитен поток Φ .

Разгледаните електромагнитни явления позволяват да се направят следните изводи. Работата на асинхронния двигател се основава на взаимодействието между резултатното магнитно поле и индуктираните от него токове в роторната намотка. Чрез това взаимодействие се създава електромагнитният момент и се извършва електромеханичното преобразуване на енергията в двигателя.

7.3. Процеси при работа на асинхронния двигател и тяхното математическо описание

7.3.1. Уравнения при неподвижен ротор

При неподвижен ротор $n=0$, хлъзгането $s=1$, а честотите на напреженията и токовете в статорната и роторната намотка са еднакви ($f_2=f_1$). В случая може да се направи аналогия с явленията при многофазен трансформатор. Разликата е, че при асинхронния двигател потокът на взаимна индукция Φ представлява въртящ се в пространството магнитен поток, докато при трансформаторите той се изменя (пулсира) само във времето. Освен това намотките на асинхронния двигател са разпределени, а на трансформатора — концентрирани. Независимо от тези разлики съществува значително сходство в математическото описание на процесите в трансформатора и в асинхронния двигател.

При неподвижен ротор резултатният магнитен поток Φ индуктира в статорната и роторната намотка е. д. н. с еднакви честоти, равни на честотата на мрежата f_1 . Ефективните стойности на тези е. д. н. за една фаза според (6.37) са:

$$(7.15) \quad \begin{cases} E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 k_{w1} \Phi; \\ E_2 = 4,44 f_2 \omega_2 k_{w2} \Phi; \end{cases}$$

където ω_1 и ω_2 са броят на навивките на една фаза, съответно на първичната и вторичната намотка; k_{w1} и k_{w2} — коефициенти на намотките;

$f_1 = f_2$ е честотата при неподвижен ротор. Отношението на двете е. д. н. представлява коефициент на трансформация на напреженията:

$$(7.16) \quad k_e = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1 k_{w1}}{\omega_2 k_{w2}}.$$

Комплексните стойности на е. д. н. $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ са във фаза. Както при трансформатора те изостават на л. 2 от потока Φ . Този поток се възбужда от резултатното м. д. н. $\dot{F}_m$ и съвпада по фаза с него.

Уравнение (7.14) е валидно и при неподвижен ротор. М. д. н. $\dot{F}_1$ и $\dot{F}_2$ достигат максималните си стойности по оста на отделните фази тогава, когато токовете в тези намотки добиват максимални стойности. Следователно $\dot{F}_1$ съвпада по фаза с тока $\dot{I}_1$, а $\dot{F}_2$ — с тока $\dot{I}_2$. Като се има предвид (6.68), може да се запише

$$(7.17) \quad \begin{cases} \dot{F}_1 = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_1 k_{w1}}{p} \dot{I}_1; \\ \dot{F}_2 = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_2 k_{w2}}{p} \dot{I}_2; \\ \dot{F}_m = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_1 k_{w1}}{p} \dot{I}_m. \end{cases}$$

След като се замести (7.17) в (7.14), се получава

$$(7.18) \quad \dot{I}_m = \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_2}{k_i},$$

където

$$(7.19) \quad k_i = \frac{m_1 \omega_1 k_{w1}}{m_2 \omega_2 k_{w2}}$$

е коефициент на трансформация на токовете, а $\dot{I}_m$ както при трансформатора представлява намагнитващият ток.

От (7.16) и (7.19) се вижда, че в общия случай, когато броят на фазите на статорната намотка m_1 е различен от броя на фазите на роторната намотка m_2 , е необходимо да се дефинират различни коефициенти на трансформация на напреженията и токовете.

Всяка намотка на асинхронната машина е свързана с определен поток на разсейване, който индуктира съответно е. д. н. Тези е. д. н. са

$$(7.20) \quad \begin{cases} \dot{E}_{o1} = -j \dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_{o2} = -j \dot{I}_2 x_2, \end{cases}$$

където x_1 и x_2 са индуктивните съпротивления на разсейване на статорната и роторната намотка при честота f_1 .
Уравненията за равновесие на напреженията в контурите на първичната и вторичната намотка на асинхронния двигател при неподвижен ротор се записват по същия начин както за трансформатора:

(7.21)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2, \end{cases}$$

където

(7.22)

$$\begin{cases} Z_1 = r_1 + jx_1; \\ Z_2 = r_2 + jx_2. \end{cases}$$

Уравнения (7.21) могат да се преобразуват по-нататък във вид, удобен за количествени изследвания, за начертване на векторната диаграма и съставяне на заместващата схема на асинхронния двигател. За целта е необходимо да се направи привеждане на вторичната намотка към първичната. Приведената вторична намотка има еднакви м. д. н., загуби и дефазиране между тока и е. д. н. с неприведената. Тя има същия брой навивки, коефициент на намотката и брой на фазите както първичната намотка.

Съгласно (7.16) е. д. н. на приведената роторна намотка е

(7.23)

$$\dot{E}_2' = \dot{E}_2 = k_e \dot{E}_1.$$

От равенството на м. д. н. на приведената и неприведената роторна намотка

$$\frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_1 k_{w1}}{p} \dot{I}_2' = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{\omega_2 k_{w2}}{p} \dot{I}_2$$

се определя приведенят роторен ток

(7.24)

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{I}_2}{k_i}.$$

Загубите в активното съпротивление на приведената и неприведаната роторна намотка трябва да бъдат еднакви:

$$m_1 r_2' \dot{I}_2'^2 = m_2 r_2 \dot{I}_2^2,$$

откъдето се намира приведеното роторно съпротивление

(7.25)

$$r_2' = r_2 \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_2'} \right)^2 = r_2 \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{\omega_1 k_{w1}}{\omega_2 k_{w2}} \right)^2 = k_e k_i r_2.$$

Фазовата разлика между е. д. н. $\dot{E}_2$ и тока $\dot{I}_2$ в приведената и неприведената намотка трябва да бъде една и съща:

$$(7.26) \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{x_2'}{r_2} = \frac{x_2}{r_2}.$$

От тук се определя приведеното индуктивно съпротивление на разсейване на роторната намотка

$$(7.27) \quad x_2' = \frac{r_0}{r_2} x_2 = k_e k_r x_2.$$

Уравненията на асинхронния двигател след привеждането се получават от (7.18) и (7.21), след като се заместят неприведените с приведените величини и се извърши необходимото преобразуване:

$$(7.28) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m. \end{cases}$$

При *накъсосъединени* роторна намотка напрежението $U_2 = 0$ и уравнението на вторичната намотка добива вида

$$(7.29) \quad \dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_2,$$

където

$$Z_2' = r_2' + jx_2'.$$

7.3.2. Работен процес на асинхронния двигател с въртящ се ротор, приведен към неподвижен ротор

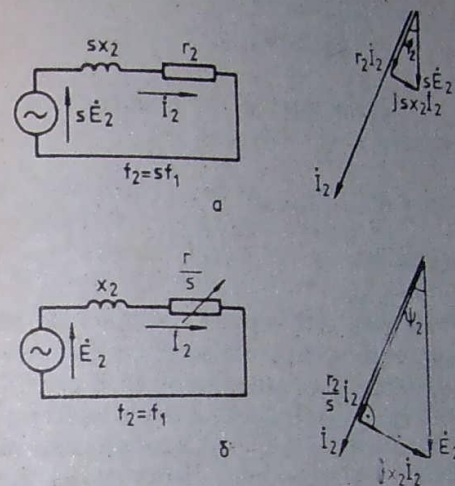
При работа на асинхронния двигател, когато роторът се върти с произволна честота n , честотите на е. д. н. и токовете в първичната и вторичната намотка са различни. Поради това електрическите величини в намотките не могат да бъдат изобразени в общи векторни диаграми. Не е възможно да се състави заместваща схема. Това налага да се потърси такова математическо описание на процеса във въртящия се ротор, което да го приведе към работа при неподвижен ротор. Преобразуването трябва да осигури еквивалентност в електромагнитно и енергийно отношение.

Най-напред се определят величините на роторния контур,

които зависят от честотата в него. Индуктивното съпротивление на разсейване на роторната намотка при въртящ се ротор е

$$(7.30) \quad x_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s x_2,$$

където x_2 е индуктивното съпротивление на същата намотка при честота f_1 .



Фиг. 7.10. Заместваща схема и векторна диаграма на вторичната верига при въртящ се (а) и неподвижен (б) ротор

Е. д. н. в ротора също може да се изрази чрез хлъзгането s и е. д. н. E_2 при неподвижен ротор, като се има предвид (7.15):

$$(7.31) \quad \dot{E}_{2s} = s \dot{E}_2.$$

Уравнението за равновесие на е. д. н. във вторичния контур на асинхронния двигател с накъсосъединен ротор ($U_2 = 0$) при работа с хлъзгане s е

$$(7.32) \quad \dot{E}_{2s} = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 x_{2s}$$

или след заместване на (7.30) и (7.31) в (7.32)

$$(7.33) \quad s \dot{E}_2 = \dot{I}_2 r_2 + j \dot{I}_2 s x_2.$$

На това уравнение съответсват заместващата схема и векторната диаграма, показани на фиг. 7.10 а. Честотата на е. д. н. и тока в роторния контур е $f_2 = s f_1$. Токът в ротора се определя от (7.33) с израза

$$(7.34) \quad \dot{I}_2 = \frac{s \dot{E}_2}{r_2 + j s x_2}.$$

Големината на този ток е

$$(7.35) \quad I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}},$$

а дефазирането му спрямо е. д. н. —

$$(7.36) \quad \psi_2 = \arctg \frac{sx_2}{r_2}.$$

Ако се разделят числителят и знаменателят в дясната част на (7.34) с хлъзгането s , се получава

$$(7.37) \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_{2s}} = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2}.$$

На израза за тока $\dot{I}_2$ (7.37) може да се придаде нов физически смисъл. Според него е. д. н. $\dot{E}_2$ и токът $\dot{I}_2$ са с честота $f_2 = f_1$. Индуктивното съпротивление на роторния контур сега е x_2 и също е определено за честота f_1 . Активното съпротивление на контура се е променило на r_2/s (фиг. 7.10 б). Следователно според (7.37) роторът на двигателя е неподвижен. Може да се покаже, че големината и фазата на тока $\dot{I}_2$ от (7.37) са същите както определените по (7.35) и (7.36) за въртящ се ротор. Загубите в активното съпротивление на роторната намотка r_2 не се променят в двата разглеждани случая. Тъй като при неподвижен ротор съпротивлението е r_2 , получава се изменение със стойността

$$(7.38) \quad r_A = \frac{r_2}{s} - r_2 = \frac{1-s}{s} r_2.$$

Следователно в еквивалентната машина с неподвижен ротор е необходимо да се увеличи активното съпротивление в роторния контур със съпротивлението r_A , което зависи от хлъзгането според (7.38). Мощността, отделена в допълнителното съпротивление r_A , е равна на механичната мощност, която се предава към вала на двигателя при работата му с хлъзгане s .

7.3.3. Заместваща схема и векторна диаграма

Привеждането на работния процес на асинхронния двигател към процеса при неподвижен ротор позволява да се разгледат явленията в него с помощта на същите методи, които се използват при изследване на трансформатори-

те. След като величините на вторичната намотка се приведат към първичната намотка, от (7.37) се получава

$$(7.39) \quad \dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2s} = \dot{I}_2 \left(\frac{r_2}{s} + jx_2 \right).$$

От (7.28) и (7.39) се получават уравненията, които описват произволно работно състояние на двигателя:

$$(7.40) \quad \begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1; \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} + j\dot{I}_2 x_2; \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_M. \end{cases}$$

На тези уравнения съответствува заместващата схема на асинхронния двигател, показана на фиг. 7.11. Тя е подобна на Т-образната заместваща схема на трансформатора. Обяснението е, че асинхронният двигател, както и трансформаторът, черпи от захранващата мрежа намагнитващ ток $\dot{I}_M$, необходим за възбуждане на магнитния поток Φ в машината. Съпротивлението във вторичния контур r_2/s позволява да бъдат отчетени както електрическите загуби в накъсосъединената роторна намотка, така и механичната мощност, която двигателят отдава чрез вала си към работната машина.

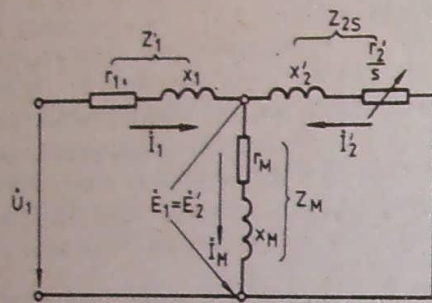
Електрическото свързване на първичния и вторичния контур в заместващата схема е възможно както при трансформатора, тъй като е. д. н. са еднакви: $\dot{E}_2 = \dot{E}_1$ (7.23). Комплексните величини (напрежение, е. д. н. и токове) са с честота f_1 . При симетрична трифазна машина всички величини в заместващата схема се отнасят за една фаза.

Параметрите на заместващата схема могат да бъдат определени чрез изчисление или опит. Изследванията показват, че когато хлъзгането е в граници $0 < s \leq s_m$, т. е. при работа на асинхронния двигател от празен ход до номинално натоварване, индуктивните съпротивления x_1 , x_2 и x_M практически остават постоянни и не зависят от токовете и хлъзгането. При известни стойности на параметрите и зададени захранващо напрежение U_1 и хлъзгане s може да се реши заместващата схема спрямо токовете.

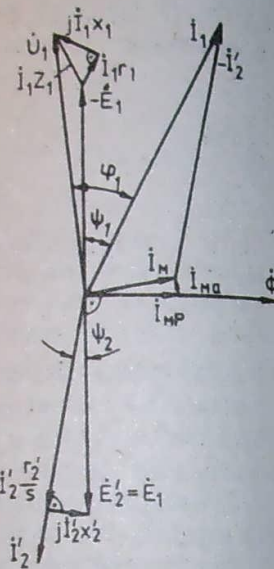
Уравнения (7.40) и заместващата схема служат за анализ на явленията при различни работни състояния на асинхронния двигател. От тях може да се построи векторната диаграма. Тя дава нагледна представа за съотношенията между комплексните величини, характеризиращи работата на двигателя.

На фиг. 7.12 е показана векторна диаграма при натоварване на асинхронния двигател. При номинален товар хлъзгането е малко — 1 до 5%. Поради това ъгъл φ_2 във векторната диаграма е малък. Намагнитващият ток на асинхронния двигател $\dot{I}_M$ е по-

голям от намагнитващия ток на трансформатора. Причина за това е наличието на въздушната междина между статора и ротора, поради което реактивната съставка на намагнитващия ток $I_{\text{мр}}$ трябва да бъде достатъчно голяма, за да възбуди основния



Фиг. 7.11. Заместваща схема на асинхронен двигател



Фиг. 7.12. Векторна диаграма на асинхронен двигател при натоварване

магнитен поток Φ . Обикновено намагнитващият ток е 15—60 % от номиналния ток, а при машините с малка мощност може да достигне 80—90 % от $I_{\text{н}}$. Относителните стойности $I_{\text{м}}/I_{\text{н}}$ на намагнитващия ток са толкова по-големи, колкото по-малка е номиналната мощност и колкото повече са полюсите на двигателя.

Увеличената стойност на намагнитващия ток предизвиква намаляване на коефициента на мощността $\cos \phi$, което е недостатък на асинхронния двигател. Асинхронните двигатели консумират от мрежата реактивна енергия, която увеличава загубите при производството и пренасянето на електрическата енергия.

Изследването на пусковия процес на асинхронния двигател изисква решаването на заместващата схема за големи стойности на хлъзгането $s_{\text{н}} < s \leq 1$. В този случай токовете в статорната и роторната намотка надвишават няколко пъти номиналните. Поради това потоците на разсейване насищат някои феромагнитни участъци на статорните и роторните зъби. Индуктивните съпротивления на разсейване x_1 и x_2 са функции на

токовете в намотките. Освен това параметрите на роторния контур x_2 и r_2 зависят от честотата f_2 и от хлъзгането s , което се дължи на ефекта на токово изместване в роторните пръчки. Активните съпротивления на намотките r_1 и r_2 са функции на температурите им. Описаните явления при големи хлъзгания превръщат заместващата схема в нелинейна електрическа верига. Изследването ѝ се затруднява. Затова при приближителен анализ на пусковия процес се приемат постоянни параметрите на активните и индуктивни съпротивления, от които е съставена заместващата схема, е сложна теоретична и приложна задача.

7.3.4. Мощности, загуби и моменти

Заместващата схема отразява всички основни явления в асинхронния двигател. Тя е удобна за изучаване на процеса на преобразуване на мощността, съпроводен със загуби на мощност в двигателя. Електромеханичното преобразуване на енергията е свързано с възникването на електромагнитен момент. Изброените величини — мощности, загуби, моменти — се намират във функционални връзки, които характеризират работата на машината и са подходящи за обяснение на редица зависимости.

Асинхронният двигател получава от мрежата, в която е включен, активна мощност:

$$(7.41) \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \phi_1.$$

Една част от консумираната мощност P_1 се изразходва под формата на електрически загуби в активното съпротивление на статорната намотка:

$$(7.42) \quad p_{\text{ел1}} = m_1 r_1 I_1^2.$$

Вследствие на пренамагнитването на магнитопровода възникват загуби от хистерезис и вихрови токове, т. е. загуби в стоманата на статора $p_{\text{с1}}$. Основните загуби в стоманата на ротора са пренебрежимо малки поради твърде малката честота на магнитното поле в ротора $f_2 = s f_1 = 1-3 \text{ Hz}$.

От заместващата схема на фиг. 7.11 следва:

$$(7.43) \quad p_{\text{с1}} = m_1 r_{\text{м}} I_{\text{м}}^2.$$

Останалата част от мощността се предава от статора към ротора чрез въртящото се магнитно поле във въздушната междина и се нарича *електромагнитна мощност*:

$$(7.44) \quad P_\delta = P_1 - p_{el1} - p_{c1}.$$

Съгласно със заместващата схема на тази мощност съответствува мощността в активното съпротивление на вторичната верига $\frac{r_2}{s}$,

$$(7.45) \quad P_\delta = m_1 \frac{r_2'}{s} I_2'^2 = m_2 \frac{r_2}{s} I_2^2.$$

Част от тази мощност се губи поради електрическите загуби в роторната намотка:

$$(7.46) \quad p_{el2} = m_1 r_2' I_2'^2 = m_2 r_2 I_2^2.$$

Следователно механичната мощност на двигателя е

$$(7.47) \quad P_{мех} = P_\delta - p_{el2}$$

или след заместване на (7.45) и (7.46) в (7.47)

$$(7.48) \quad P_{мех} = m_1 r_2' I_2'^2 \frac{1-s}{s} = m_2 r_2 I_2^2 \frac{1-s}{s}.$$

Този израз съответствува на мощността, която се отделя в допълнителното съпротивление в роторния контур според (7.38). То беше получено при привеждане на работния процес на асинхронния двигател с въртящ се ротор към работен процес при неподвижен ротор.

Една част от механичната мощност $P_{мех}$ се превръща в механични и допълнителни загуби. Механичните загуби $p_{мех}$ се дължат на триене в лагерите, триене на въздуха при вентилацията на машината и триене между четките и контактните пръстени (при двигатели с навит ротор).

Допълнителните загуби p_d са предизвикани от висшите пространствени хармоници на магнитното поле. Тези загуби се подават много трудно на точно изчисление или експериментално определяне. Съгласно със стандартите те се приемат 0,5 % от полезната мощност P_2 .

От казаното дотук следва, че полезната механична мощност на вала на двигателя е

$$(7.49) \quad P_2 = P_{мех} - p_{мех} - p_d.$$

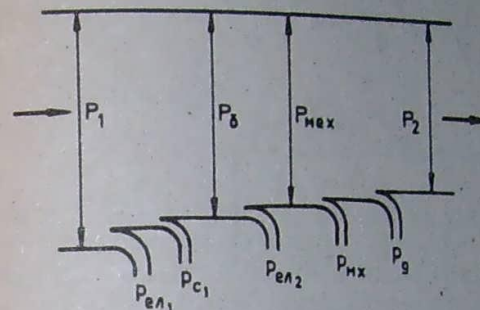
Въз основа на направения анализ на загубите и мощностите на фиг. 7.13 е построена енергийната диаграма на асинхронния двигател.

Общите загуби са

$$(7.50) \quad \Sigma p = p_{el1} + p_{c1} + p_{el2} + p_{мех} + p_d.$$

Полезната мощност е

$$(7.51) \quad P_2 = P_1 - \Sigma p,$$



Фиг. 7.13. Енергийна диаграма на асинхронен двигател

а к.п.д. на двигателя—

$$(7.52) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}.$$

К. п. д. на асинхронните двигатели с номинална мощност от 1 до 1000 kW се намират в граници 0,72—0,95. По-големи стойности на к. п. д. имат двигателите с по-голяма мощност и по-голяма честота на въртене.

Да разгледаме още някои закономерности, които произлизат от зависимостите на мощностите и загубите. От (7.45) и (7.46) се получава:

$$(7.53) \quad p_{el2} = s P_\delta.$$

Горното уравнение позволява да се определят експериментално електрическите загуби в накъсосъединената роторна намотка на двигателя, като се използва и (7.44). Известно е, че активното съпротивление на накъсосъединената намотка не може да се измери директно.

От (7.45) и (7.48) се получава

$$(7.54) \quad P_{мех} = (1-s) P_\delta.$$

Тази зависимост между механичната мощност $P_{мех}$ и електромагнитната мощност P_δ е валидна при всяка стойност на хлъзгането s . Тя дава възможност да се определи електромагнитният момент на асинхронния двигател.

Електромагнитният момент M на асинхронния двигател при стационарна работа ($n = \text{const}$) се уравновесява от товарния момент, който има две съставки: съпротивителния момент на задвижваната машина M_2 и момента M_0 , дължащ се на механичните загуби. Действително, като се разделят членовете на (7.49) на ъгловата скорост на ротора Ω , се получава

$$(7.55) \quad \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega} - \frac{P_{\text{мех}} + P_d}{\Omega}$$

или

$$(7.56) \quad M = M_2 + M_0,$$

където

(7.57)

$$\begin{aligned} M &= \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega}; \\ M_2 &= \frac{P_2}{\Omega}; \\ M_0 &= \frac{P_{\text{мех}} + P_d}{\Omega}. \end{aligned}$$

В израза за електромагнитния момент (7.57) се замества $P_{\text{мех}}$ от (7.54). Получава се

$$(7.58) \quad M = \frac{P_{\text{мех}}}{\Omega} = \frac{(1-s) P_d}{\Omega} = \frac{P_d}{\Omega_1},$$

тъй като $\Omega = (1-s) \Omega_1$.

Ъгловата скорост на въртящото се магнитно поле е

$$(7.59) \quad \Omega_1 = 2\pi n_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{\omega_1}{p}.$$

Като се заместят стойностите на P_d и Ω_1 от (7.45) и (7.59) в (7.58), се намира

$$(7.60) \quad M = \frac{pm_1}{2\pi f_1} I_2'^2 \frac{r_2'}{s}.$$

От (7.60) електромагнитният момент може да се изрази чрез напрежението U_1 , хлъзгането s и параметрите на заместващата схема. За целта трябва да се определи токът I_2' . Възможно е токът I_2' да бъде определен точно, като се вземат предвид параметрите на намагнитващия контур в заместващата схема. При голямо хлъзгане намагнитващият ток е относително малък и тогава може да се приеме, че импедансът на намагнитващия контур

е безкрайно голям. В този случай от заместващата схема се определя приблизително

$$(7.61) \quad I_2' \approx \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

След заместване на (7.61) в (7.60) се получава

$$(7.62) \quad M = \frac{pm_1}{2\pi f_1} \cdot \frac{U_1^2}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2} \cdot \frac{r_2'}{s}.$$

Изразът (7.62) е удобен за анализ на зависимостта на електромагнитния момент от хлъзгането $M = f(s)$. Тази характеристика представлява разновидност на механичната характеристика на асинхронния двигател $M = f(n)$. При работа на асинхронната машина като двигател хлъзгането се изменя между 1 и 0. В тази област моментът има следните характерни стойности.

Максималният момент се определя чрез производната на момента, приравнена на нула:

$$\frac{dM}{ds} = 0,$$

откъдето се намира стойността на т. нар. *критично хлъзгане*:

$$(7.63) \quad s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}.$$

При двигателите със средна и голяма мощност r_1^2 е пренебрежимо малко спрямо $(x_1 + x_2')^2$. Тогава

$$(7.64) \quad s_m \approx \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}.$$

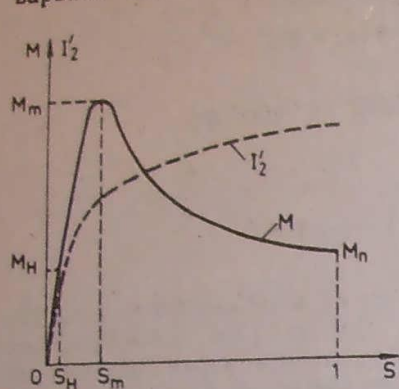
След като се замести критичното хлъзгане от (7.64) в (7.62), се получава следният израз за *максималния момент*:

$$(7.65) \quad M_m \approx \frac{pm_1 U_1^2}{2 \cdot 2\pi f_1 [r_1 + (x_1 + x_2')]}.$$

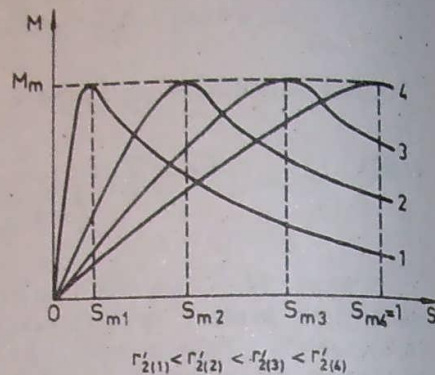
При включване на асинхронния двигател към мрежата роторът отначало е неподвижен ($n = 0$). В (7.62) се замества $s = 1$ и се определя *пусковият момент*:

$$(7.66) \quad M_n = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

Могат да бъдат определени още две точки от характеристиката $M=f(s)$. При $s=0$ токът във вторичния контур $I'_2=0$ и електромагнитният момент също е нула ($M=0$). При номинално натоварване точката от характеристиката $M=f(s)$ има координати



Фиг. 7.14. Зависимости на електромагнитния момент M и на тока I'_2 от хлъзгането s



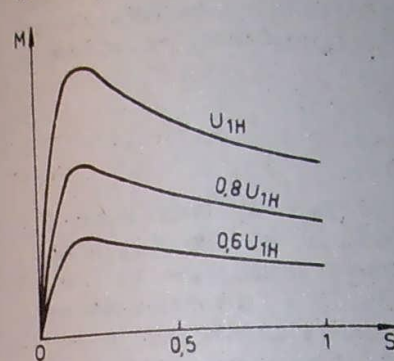
Фиг. 7.15. Характеристики на електромагнитния момент при различни стойности на съпротивлението във вторичната верига

s_n, M_n). Зависимостите на момента M и на тока I'_2 от хлъзгането s при номинални стойности на напрежението и честотата са показани на фиг. 7.14. При увеличаване на хлъзгането от $s=0$ до $s=s_m$ моментът M нараства, като достига максималната си стойност M_m . При по-нататъшното увеличаване на хлъзгането моментът намалява, въпреки че токът I'_2 се увеличава. Този характер на кривата $M=f(s)$ се обяснява с това, че с увеличаване на s токът I'_2 нараства за сметка на своята реактивна съставка $I'_2 \sin \psi_2$, тъй като ъгълът ψ_2 според (7.36) се увеличава. Активната съставка на тока $I'_2 \cos \psi_2$, която определя електромагнитния момент, при увеличаване на хлъзгането до s_m расте, а след това започва да намалява.

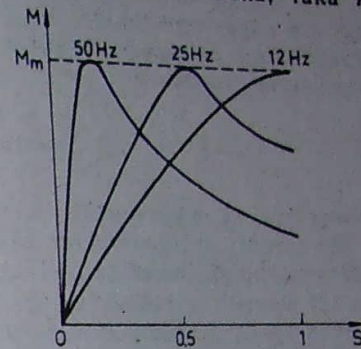
От получените уравнения за критичното хлъзгане, максималния момент и пусковия момент могат да се направят няколко извода. От (7.65) следва, че максималният момент M_m не зависи от активното съпротивление на вторичната верига. Обаче критичното хлъзгане s_m , при което се получава този момент, съгласно със (7.64) е пропорционално на това съпротивление. Според (7.66) пусковият момент M_n се увеличава с нарастване на r'_2 . Това увеличение на M_n продължава, докато при $s_m=1$ се получи $M_n=M_m$. След това при по-нататъшното увеличаване на r'_2 пусковият момент намалява. На фиг. 7.15 са показани характеристиките $M=f(s)$

$=f(s)$ за един двигател при различни стойности на вторичното съпротивление.

Трябва да се отбележи, че величината r'_2 съдържа в себе си както активното съпротивление на роторната намотка, така и



Фиг. 7.16. Характеристики на електромагнитния момент при различни стойности на U_1



Фиг. 7.17. Характеристики на електромагнитния момент за различни честоти при $\frac{F_1}{f_1} = \text{const}$

външното съпротивление, което може да бъде включено във вторичната верига чрез контактните пръстени при асинхронните двигатели с навит ротор. Увеличаването на пусковия момент чрез увеличаване на r'_2 се съпровожда с намаляване на I'_2 съгласно със (7.61), което води до намаляване на пусковия ток. Всичко това се отразява благоприятно върху протичането на пусковия процес и намира практическо приложение.

При асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор подобряването на пусковите характеристики чрез повишаване на активното съпротивление на вторичната верига се постига със специални конструктивни форми на роторните пръчки. Такива са двигателите с дълбоки канали и двигателите с двойнокафезен ротор. При тези конструкции се получава ефект на токово изместване, който предизвиква увеличение на съпротивлението на роторната намотка при пускане. С развъртането на ротора ефектът на токово изместване в роторните пръчки постепенно отслабва, а активното съпротивление на вторичната намотка при номинална честота на въртене намалява до нормалната си стойност.

При дадена честота f_1 и параметри на двигателя електромагнитният момент M зависи от квадрата на приложеното напрежение, както се вижда от (7.62). На фиг. 7.16 са показани криви $M=f(s)$ за различни стойности на U_1 . С намаляването на напрежението намалява и пусковият ток, тъй

като токът I_2' е пропорционален на U_1 . Посочените ефекти имат практическо приложение при пускането и регулирането на асинхронните двигатели.

От гледна точка на регулирането представлява интерес видът на характеристиките $M / f(s)$ при различна честота на захранващото напрежение. Изследванията показват, че когато е изпълнено условието

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const},$$

стойността на максималния момент се запазва постоянна. От (7.64) следва, че критичното хлъзгане s_m се изменя обратнопропорционално на честотата f_1 . Поради това с намаляване на f_1 пусковият момент се увеличава (фиг. 7.17). Това обстоятелство позволява да се реализират подходящи закони за пускане и регулиране на асинхронни двигатели при променлива честота на напрежението.

При решаване на редица практически задачи на електрозадвижванията с асинхронни двигатели се налага да се определи зависимостта $M / f(s)$ по каталожни данни, без да е необходимо изчисляването на параметрите на двигателя. Получава се следният приблизителен аналитичен израз за отношението на електромагнитния и максималния момент:

$$(7.67) \quad \frac{M}{M_m} = \frac{2+2s_m}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s} + 2s_m}.$$

От каталожните данни могат да се изчислят номиналният момент M_n и номиналното хлъзгане s_n , а от кратността на максималния момент k_m се определя M_m $k_m M_n$. След заместване на тези данни в (7.67) може да се изчисли s_m . Тогава, отново от (7.67) може да се определи моментът M за произволно хлъзгане s и да се получи цялата характеристика $M / f(s)$.

7.4. Характеристики на асинхронния двигател

Работният процес на асинхронния двигател може да бъде изследван с помощта на заместващата схема, ако са известни параметрите ѝ. Те могат да се определят експериментално чрез опитите на празен ход и късо съединение. Тези два опита се провеждат сравнително лесно.

При опит на празен ход роторът на двигателя се върти без натоварване на вала ($P_2 = 0$). По време на опита се из-

мерват токовете във всички фази и се определя средната стойност на тока на празен ход I_0 . Измерва се и активната мощност P_0 , получена от статорната намотка. Двете величини I_0 и P_0 се измерват при различни стойности на напрежението U_1 . По данните от опита се построява характеристиката на празен ход $U_1 = f(I_0)$, която е показана на фиг. 7.18. За $U_1 = U_n$ се отчита стойност I_{0n} . Поради насищането на феромагнитните участъци на магнитната верига зависимостта $U_1 = f(I_0)$ е нелинейна. Тъй като при празен ход $I_2' \approx 0$ и с достатъчна точност важи

$$\dot{E}_1 = -j x_m I_0,$$

от (7.40) се получава

$$U_1 = r_1 I_1 + j(x_1 + x_m) I_1.$$

Първият член в дясната страна на горното уравнение е пренебрежимо малък спрямо втория. Тогава за $U_1 = U_n$

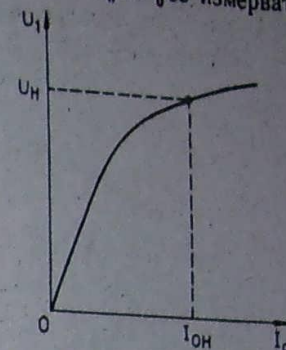
$$(7.68) \quad x_1 + x_m = \frac{U_n}{I_{0n}}.$$

Ако за всяка стойност на U_1 електрическите загуби се извадят от мощността P_0 , може да се определи сумата на загубите в стотаната и механичните загуби:

$$(7.69) \quad p_c + p_{\text{мех}} = P_0 - m_1 r_1 I_0^2.$$

Механичните загуби $p_{\text{мех}}$ не зависят от напрежението, тъй като честотата на въртене при опита на празен ход практически не се променя. От друга страна, загубите в стотаната p_c зависят от квадрата на магнитната индукция и следователно са пропорционални на U_1^2 . Това е основание да се построи получената от (7.69) зависимост във функция от U_1^2 . Тя е права линия (фиг. 7.19). Нейното продължение до абсцисната ос (при $U_1 = 0$) дава механичните загуби. По такъв начин от опита на празен ход могат да се получат разделени загубите p_c и $p_{\text{мех}}$.

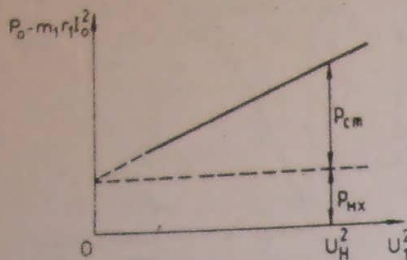
Опитът на късо съединение се провежда при затворена на късо роторна намотка и неподвижен ротор ($s=1$), който вал трябва да се закрепва по подходящ начин. Към статорната намотка се подава симетрично напрежение с понижени стойности, така че токът в първичната намотка I_{1k} да не надвишава номиналния повече от 1,2 пъти. Освен средната стойност на тока



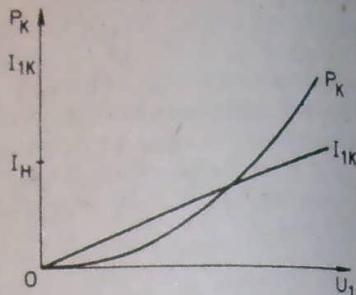
Фиг. 7.18. Характеристика на празен ход на асинхронен двигател

I_{1k} се измерва и активната мощност P_k в зависимост от напрежението. Опитът трябва да завърши бързо, за да се избегне прекомерното нагряване на намотките.

На фиг. 7.20 са показани характеристиките на късо съединение. Характеристиката $I_{1k}(U_1)$ има праволинеен характер,



Фиг. 7.19. Разделяне на загубите на празен ход на асинхронен двигател



Фиг. 7.20. Характеристики на късо съединение на асинхронен двигател

тъй като при токове до номиналния магнитната верига е ненаситена. Когато токът на късо съединение е равен на номиналния ток, напрежението на статорната намотка е малко — около 10—25 % от номиналното напрежение. Стойностите на е. д. и. и на магнитния поток са много малки. Затова могат да бъдат направени следните допускания.

Първо, приема се, че намагнитващият ток е пренебрежимо малък ($I_m = 0$), откъдето следва $I_{1k} = -I'_{2k}$. Тогава от (7.40), след като се вземе предвид, че $E_1 = E'_2$ и $s = 1$, се получава

$$(7.70) \quad \dot{U}_1 = (r_1 + r'_2) \dot{I}_{1k} + j(x_1 + x'_2) \dot{I}_{1k}$$

или

$$(7.71) \quad \dot{U}_1 = Z_k \dot{I}_{1k},$$

откъдето

$$(7.72) \quad z_k = \frac{U_1}{I_{1k}}.$$

В (7.72) z_k е импедансът на късо съединение:

$$(7.73) \quad z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2},$$

където

$$(7.74) \quad r_k = r_1 + r'_2,$$

$$(7.75) \quad x_k = x_1 + x'_2.$$

Поради малката стойност на резултатния магнитен поток загубите в статорната намотка са малки. Тъй като роторът е неподвижен, механични загуби няма. Следователно мощността P_k е равна на електрическите загуби в първичната и вторичната намотка:

$$(7.76) \quad P_k = m_1 r_1 I_{1k}^2 + m_1 r'_2 I_{2k}^2 = m_1 (r_1 + r'_2) I_{1k}^2.$$

От (7.76) може да бъде изчислено активното съпротивление при късо съединение:

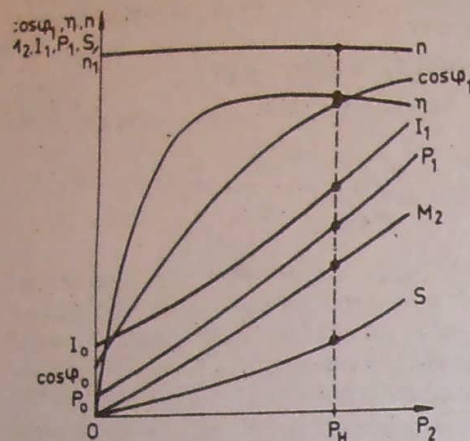
$$(7.77) \quad r_k = \frac{P_k}{m_1 I_{1k}^2}.$$

Разглежданите зависимости дават възможност за определяне параметрите на заместващата схема по опитни данни. Съпротивлението на статорната намотка на асинхронния двигател може да бъде измерено непосредствено. Тогава от (7.74) и (7.77) се изчислява r'_2 . За повечето асинхронни двигатели с нормално изпълнение е валидно приблизителното равенство $x_1 \approx x'_2$. Това позволява да се определят стойностите на индуктивните съпротивления от разсейване на първичната и вторичната намотка с помощта на (7.72), (7.73) и (7.75). Индуктивното съпротивление на взаимна индуктивност x_m се определя от (7.68), а активното съпротивление в намагнитващия контур r_m — от (7.43).

Когато са известни параметрите на заместващата схема, може да се изчислят работните характеристики на асинхронния двигател, като се използват зависимостите от 7.3.3 и 7.3.4. Опитното определяне на работните характеристики е по-трудно при двигателите с голяма мощност. За двигателите с малка и средна мощност се препоръчва снемането на работните характеристики при опит на непосредствено натоварване, като се изменя полезната мощност на вала P_2 от нула до номиналната.

Работните характеристики на асинхронния двигател представляват зависимостите на консумираната мощност P_1 , токът в статорната намотка I_1 , коефициентът на мощността $\cos \varphi_1$, моментът на вала M_2 , хлъзгането s , честотата на въртене на ротора n и к. п. д. η от полезната мощност P_2 при работа с номинални стойности на напрежението и честотата (фиг. 7.21). Тези характеристики дават възможност да се определят величините, които характеризират работното състояние на двигателя при различно натоварване. Точката $P_2 = 0$ съответствува на празен ход, а точката $P_2 = P_n$ — на номинално натоварване. Величините, които съответствуват на номиналната мощност P_n , се наричат номинални величини, например номинален момент M_n , номинален ток I_n , номинална честота на въртене n_n и т. н. От работните характеристики се вижда, че асинхронният двигател работи с големи стойности на $\cos \varphi_1$ и η при натоварване,

близко до номиналното. Оттук следва, че за електрозадвижването на всеки работен механизъм трябва да се избере двигател с подходяща мощност, а при експлоатацията не трябва да се използва малко натоварване или празен ход на механизма и на асинхронния двигател. Когато посочените изисквания не са спазени, увеличава се излишно разходът на електрическа енергия и се влошава режимът на работа на енергийната система. Поради голямото разпространение на асинхронните двигатели в промишлеността степента на тяхното натоварване влияе значително на работата на електроенергийната система и нормалното електро-



Фиг. 7.21. Работни характеристики на асинхронен двигател

снабдяване на промишлените предприятия.

Пусковият процес и пусковите свойства на асинхронния двигател се анализират и оценяват с помощта на характеристиките $M=f(n)$ и $I_1=f(n)$ (фиг. 7.22). Механичната характеристика $M=f(n)$ е аналогична на характеристиката $M=f(s)$, разгледана в 7.3.4. При постоянна честота на напрежение съществува съответствие между осите n и s според (7.7). Характерните точки от кривите $M=f(n)$ и $I_1=f(n)$ се изразяват в относителни единици спрямо номиналните стойности и имат важно практическо значение.

Отношението

(7.78)

$$k_m = \frac{M_m}{M_n}$$

се нарича кратност на максималния момент и характеризира претоварващата способност на асинхронния двигател. При асинхронните двигатели с общо предназначение $k_m=1,7-3,0$. Отношението

(7.79)

$$k_n = \frac{M_n}{M_s}$$

се нарича кратност на пусковия момент. При асинхронните двигатели с общо предназначение k_n се намира в граници 1,0—2,2.

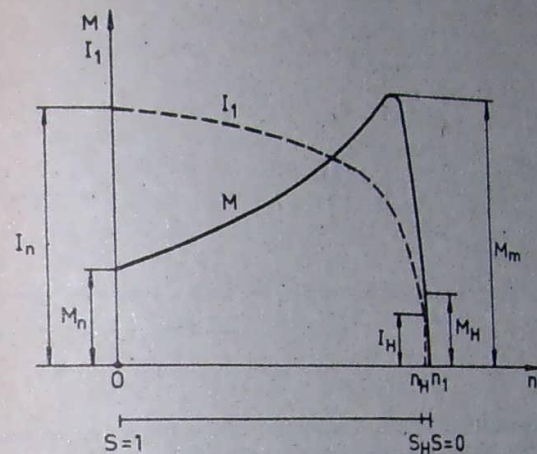
Третият показател, от който зависи успешното пускане на асинхронния двигател, е пусковият ток I_n — стойността на статорния ток при $s=1$ и $U_1=U_n$. Отношението

(7.80)

$$k_i = \frac{I_n}{I_n}$$

се нарича кратност на пусковия ток. За двигателите с общо предназначение $k_i=3,0-7,5$.

Стойностите на показателите k_m , k_n и k_i зависят от номиналната мощност и броя на полюсите и са определящи по отношение на качествата на асинхронните двигатели.



Фиг. 7.22. Механична характеристика $M=f(n)$ и зависимост на статорния ток $I_1=f(n)$ на асинхронен двигател

7.5. Пускане на асинхронните двигатели

7.5.1. Общи сведения

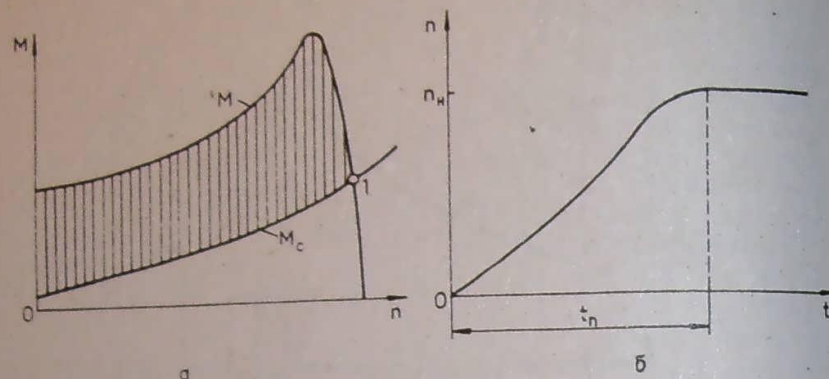
Пускането в ход на асинхронния двигател е електромеханичен преходен процес, който има важно значение в експлоатацията. Този процес започва с включването на статорната намотка към мрежата, когато роторът е неподвижен ($n=0, s=1$). Под действие на електромагнитния момент роторът на двигателя и въртящият се от него механизъм се ускоряват и в края на пусковия процес достигат скорост, близка до номиналната (n_n, s_n).

Повечето асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор се пускат чрез включване към пълното напрежение на мрежата.

При това възниква краткотраен електромагнитен преходен процес. Ако се пренебрегне влиянието на преходните съставки на токовете и момента, процесът на развъртане може да се изследва с помощта на характеристиките $M=f(n)$ и $I_1=f(n)$. Възможно е

да се направи още едно допускане. Моментът M_0 в (7.56), който се дължи на механичните и допълнителните загуби, е пренебрежимо малък. Може да се приеме, че моментът на вала на двигателя е равен на електромагнитния момент. Тогава пусковият процес ще се опише с уравнението за движение

$$(7.81) \quad M = M_c + J \frac{d\Omega}{dt}$$



Фиг. 7.23. Съотношения между моментите при пускане и работа на асинхронен двигател (а) и зависимост $n=f(t)$ при пускане (б)

Тук M е електромагнитният момент на двигателя, M_c — съпротивителният момент, който се определя от задвижвания механизъм, J — инерционният момент на всички въртящи се маси. В (7.81) Ω може да се изрази чрез n и да се решава уравнението при зададена стойност на J и зададени зависимости $M=f(n)$ и $M_c=f(n)$ — фиг. 7.23 а. В резултат на решението се получава зависимостта $n=f(t)$ и се определя времето за пускане t_n (фиг. 7.23 б).

Началните условия за интегриране на (7.81) са $t=0$, $n=0$. Тъй като пусковият момент е по-голям от съпротивителния ($M_n > M_c$), под действието на положителното ъглово ускорение роторите на агрегата двигател — работен механизъм започват да се въртят. Положителното ускорение при $M - M_c > 0$ продължава до достигане на т. 1 (фиг. 7.23 а), където настъпва равновесие между двигателния и съпротивителния момент ($M = M_c$). Пусковият процес е завършил. Двигателят работи стационарно с момент и честота на въртене, съответстващи на пресечната точка 1 на характеристиките $M=f(n)$ и $M_c=f(n)$.

Изследванията показват, че при развъртането на асинхронния двигател половината от енергията, която се предава на ротора, се превръща в топлина и допринася за загряването на намотката. Другата половина от енергията представлява кинетичната енергия, която ускорява въртящия се ротор. Отделената енергия в

първичната намотка е малко по-голяма отколкото във вторичната. Необходимо е да се определят електрическите загуби в намотките на статора и ротора в процеса на пускане. От тези загуби зависят температурите на намотките в края на пускането. Средствителност на пусковия процес, чести пускания). При тях съществува опасност от недопустимо загряване на намотките. В такива случаи топлинният режим по време на пускането е решаващ за безотказната работа на статорната и роторната намотка.

Времето за развъртане на двигателя и механизма се увеличава при намаляване на разликата $M - M_c$ (защрихованата област на фиг. 7.23 а) и при по-голям инерционен момент J . Следователно върху пусковия процес оказват влияние кратностите на пусковия и максималния момент (k_n, k_m), особеностите на механизма (характеристика на съпротивителния момент, инерционен момент), начинът на пускане на двигателя и др. Загряването на намотките зависи и от кратността на пусковия ток k_i . Всички тези характеристики и показатели се вземат предвид при избора на двигателя и схемата за неговото пускане.

7.5.2. Начини на пускане на асинхронни двигатели

При разглеждане на възможните начини за пускане на асинхронните двигатели е необходимо да се отчитат следните основни положения.

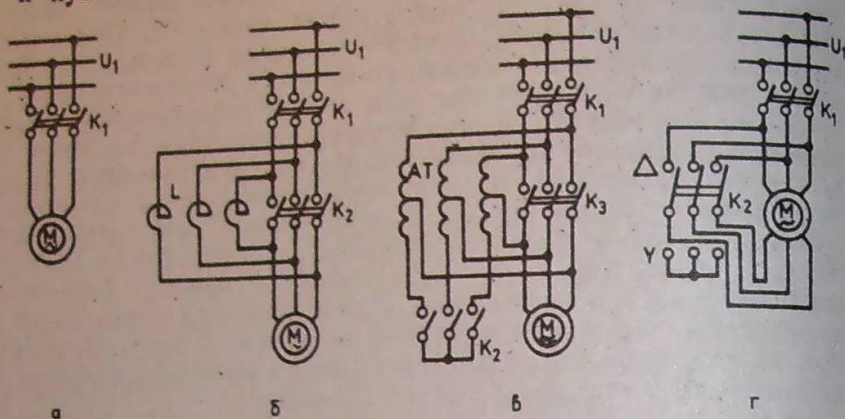
Първо, двигателят трябва да развива по-голям момент от съпротивителния момент на механизма, за да завърши успешно развъртането до номиналната честота на въртене. Трябва да се има предвид, че загряването на намотките е пропорционално на времето за пускане, което е толкова по-малко, колкото по-голяма е разликата $M - M_c$.

Второ, големината на тока по време на пускането трябва да бъде ограничена до стойности, които не са опасни за намотките на двигателя и не смущават нормалната работа на електрическата мрежа. Освен термично действие пусковият ток поражда значителни електродинамични сили, които предизвикват вибрации и деформации на намотките. Големият пусков ток може да доведе и до недопустимо понижение на напрежението на мрежата, в която се включва двигателят.

Трето, схемата и пусковите съоръжения трябва да бъдат по възможност прости, с по-малка стойност, но с голяма надеждност.

Най-простият и сигурен начин за пускане на асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор е непосредственото им включване в мрежа с номинално напрежение (фиг. 7.24 а). Такова пускане се нарича директно. При него пусковият ток обикно-

вено е 4 до 7 пъти по-голям от номиналния ток. Директното пускане се използва при двигатели с малка, средна и голяма мощност. То е възможно винаги когато мрежата е достатъчно мощна и пусковите токове не предизвикват недопустимо спадане на



Фиг. 7.24. Схеми за пускане на асинхронен двигател с накъсосъединен ротор

напрежението. Когато в мрежата има силови и осветлителни товари, се допуска понижаване на напрежението до $(0,85-0,90)U_n$. Съвременните електрически мрежи притежават необходимата мощност, което прави в повечето случаи възможно директно пускане на асинхронните двигатели. Трябва обаче да се има предвид, че според (7.66) пусковият момент M_n зависи от квадрата на захранващото напрежение U_1^2 . Следователно спадането на напрежението на мрежата може дотолкова да намали момента, че да се възпрепятствува нормалното пускане. В такива случаи се прилага някоя от другите схеми за пускане (фиг. 7.24 б, в, г).

Пускане с реактор (фиг. 7.24 б) се използва при мощни двигатели за високо напрежение. Пусковият ток се ограничава чрез реактора (индуктивността) L , включен между мрежата и статорната намотка на двигателя. Пусковият ток може да се определи приблизително от (7.72):

$$(7.82) \quad I_n = \frac{U_1}{z_k} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$$

При пускане с реактор пусковият ток се намалява за сметка на индуктивното съпротивление на реактора x_L :

$$(7.83) \quad I_{np} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_k + x_L)^2}}$$

С помощта на (7.66) може да се получи отношението между пусковите моменти без и с реактор:

$$(7.84) \quad \frac{M_n}{M_{nL}} = \frac{r_k^2 + (x_k + x_L)^2}{r_k^2 + x_k^2}$$

От горните уравнения не е трудно да се установи, че използването на реакторно пускане води до намаляване на пусковия момент с квадрата на отношението, с което се намалява пусковият ток. Следователно схемата е приложима при пускане на двигателя на празен ход или с непълно натоварване. След като завърши развъртането, се включва шунтиращият прекъсвач K_2 , за да не се получават загуби в реактора.

При пускане с автотрансформатор (фиг. 7.24 в) пусковият момент на двигателя и пусковият ток, получаван от мрежата, се намаляват в едно и също отношение. Затова при еднакви пускови токове в мрежата при пускане с автотрансформатор моментът е по-голям отколкото при пускане с реактор. Обаче това предимство се постига с цената на значително усложняване и оскъпяване на пусковата апаратура. Последователността на операцията при пускането е следната. При включен прекъсвач K_2 се включва K_1 , така че с автотрансформатора AT на двигателя се подава понижено напрежение. След развъртане на ротора до определена скорост прекъсвачът K_2 се изключва. Тогава част от намотката на автотрансформатора остава свързана последователно на двигателя като реактор. След пълното развъртане се включва шунтиращият прекъсвач K_3 и двигателят получава пълното напрежение на мрежата.

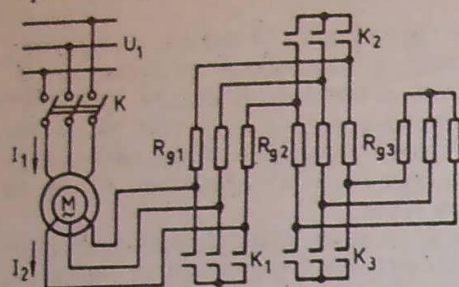
Асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор за ниско напрежение и по-големи мощности се пускат чрез превключване на схемата на статорната намотка от звезда в триъгълник. Този начин може да се приложи само в случаите, когато статорната намотка е предназначена да работи при свързване триъгълник с номиналното линейно напрежение. В случая на табелката на двигателя е означено $\Delta - 380 V$.

Схемата за пускане е показана на фиг. 7.24 г, като към прекъсвачите са изведени и шестте края на статорната намотка, а в клемното табло са отстранени съединителните пластини (вж. фиг. 7.3). Прекъсвачът K_2 е включен в положение Y , след което се включва K_1 . След като двигателят се развърти напълно, K_2 се превключва в положение Δ .

При директно пускане на двигателя в звезда в сравнение с пускането при свързване триъгълник фазното напрежение на статорната намотка се намалява $\sqrt{3}$ пъти, поради което пусковият момент намалява $(\sqrt{3})^2 = 3$ пъти. Пусковият ток във фазата на намотката намалява $\sqrt{3}$ пъти, а в мрежата — $\sqrt{3} \cdot \sqrt{3} = 3$ пъти.

Методът на пускане на асинхронните двигатели чрез превключване звезда—триъгълник е използван доста в миналото, но понастоящем приложението му е намаляло значително.

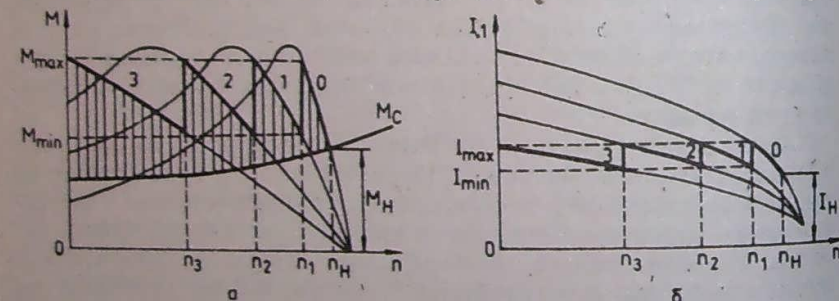
Разгледаните дотук методи се отнасят до пускането на асинхронните двигатели с нахъсосъединен ротор. По-долу се разглежда



Фиг. 7.25. Схема за пускане на асинхронен двигател с фазов ротор

голям инерционен момент на задвижваните маси.

От (7.66) и фиг. 7.15 се вижда, че пусковият момент може да се увеличи чрез увеличаване на активното съпротивление на вторичната верига r_2 . Освен това се намалява пусковият ток на двигателя, както следва от (7.82). При двигателите с навит ротор е



Фиг. 7.26. Характеристики на електромагнитния момент (а) и на тока в статорната намотка (б) при пускане на асинхронен двигател с фазов ротор

възможно с контактните пръстени към съпротивлението на роторната намотка да се прибави съпротивлението R_d на допълнителен външен резистор, наречен *пусков реостат* (фиг. 7.25). В разглеждания на фигурата случай пусковият реостат има три степени, които се изключват чрез последователно включване на контакторите K_3 , K_2 и K_1 . Характеристиките на електромагнитния момент $M=f(n)$ и на тока в статорната намотка $I_1=f(n)$ при работа на различните степени на реостата са изобразени на фиг. 7.26 а, б. Да предположим, че отделните степени на пусковия

реостат и интервалите от време за тяхното превключване са определени така, че моментът на двигателя в процеса на пускането се изменя между предварително избраните максимална и минимална стойност $M_{\max}$ и $M_{\min}$. След включването към мрежата двигателят работи по характеристиката 3. Тази характеристика съответствува на трите степени на реостата, т. е. на пълното му съпротивление. С увеличаване на скоростта, т. е. на пълното му $=n_3$ се включва контакторът K_3 , който шунтира третата степен на реостата. Вследствие на това работата на машината се премества върху характеристиката 2, която съответствува на първите две степени на реостата. При по-нататъшното развъртане на ротора честотата на въртене се увеличава до $n=n_2$. В този момент с контактора K_2 се шунтира втората степен на пусковия реостат и т. н. След включване на контактора K_1 работната точка на двигателя преминава върху естествената характеристика 0, при която $R_d=0$. Роторната намотка е свързана нахъс и пусковият процес завършва в точката на стационарна работа (n_n , M_n). Заширикованата област на фиг. 7.26 а представлява разликата между двигателния и съпротивителния момент $M-M_c$, под действието на която се ускоряват въртящите се маси. Както се вижда от фиг. 7.26б, при превключването на степените на пусковия реостат статорният ток се колебае между $I_{\max}$ и $I_{\min}$.

Пускането в ход чрез включване на реостат в роторната верига се прилага при асинхронни двигатели с голяма мощност. Използват се жични или водни пускови реостати. Пусковият процес може да бъде автоматизиран, така че да се получат най-благоприятни пускови характеристики. Обаче пусковият реостат повишава цената на двигателя, увеличава габаритите и усложнява и внася допълнителни усложнения при нейното обслужване.

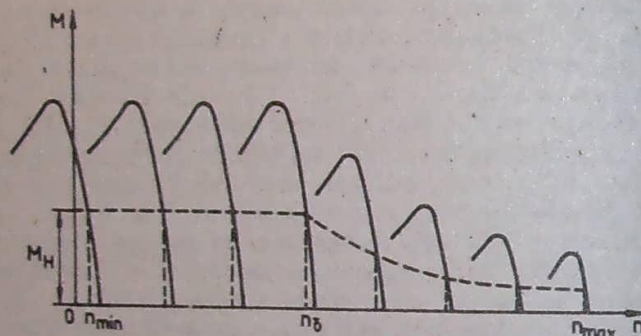
При крановите асинхронни двигатели с навит (фазов) ротор, които са с по-малки мощности, пусковият реостат служи и за регулиране на честотата на въртене. Този метод за регулиране се съпровожда със значителни загуби в съпротивлението на реостата.

7.6. Регулиране на честотата на въртене

7.6.1. Регулиране чрез изменение на честотата на захранващото напрежение

Честотата на въртене на асинхронния двигател с накъсосъединен ротор може да се регулира, като се променя честотата на захранващото напрежение:

$$n = n_1(1-s) = \frac{60f_1}{p} (1-s).$$



Фиг. 7.27. Механични характеристики на асинхронен двигател при честотно регулиране

Методът има следните съществени предимства. Отсъствието на плъзгащи контакти увеличава надеждността. Чрез плавно изменение на честотата се постига плавно регулиране на скоростта на двигателя. Регулирането се извършва с минимално увеличение на загубите в двигателя. Задвижването притежава много добри динамични качества, бързодействие, стабилност и точност при изпълнение на заданието. Машината може да се реверсира и да работи като двигател или генератор в двете посоки на въртене.

В съвременните системи за честотно регулиране асинхронният двигател се захранва от управляем полупроводников преобразувател на честота. Честотата f_1 и напрежението U_1 се изменят в зависимост от закона за регулиране. Приложение намира регулирането в две зони. В първата зона честотата на въртене се регулира от минималната $n_{\min}$ до базовата n_b при постоянен момент $M = \text{const}$. Във втората зона регулирането от n_b до $n_{\max}$ е при постоянна мощност $P = \text{const}$, поради което моментът намалява с

увеличаване на честотата. На фиг. 7.27 са показани няколко механични характеристики при честотно регулиране на асинхронния двигател в две зони.

За да се получи $M = \text{const}$, е необходимо да се поддържа постоянен магнитен поток Φ . От израза за е. д. н. на първичната намотка

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{w1} \Phi$$

следва, че условието $\Phi = \text{const}$ се изпълнява, когато

$$(7.85) \quad \frac{E_1}{f_1} = \text{const}$$

или приблизително

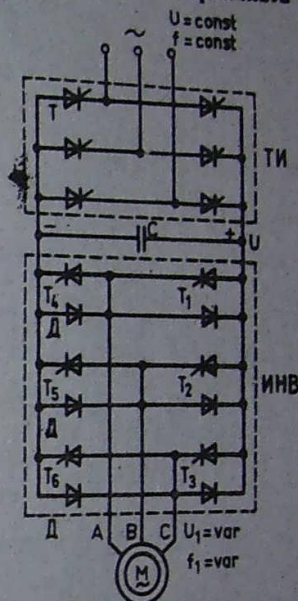
$$(7.86) \quad \frac{U_1}{f_1} = \text{const}.$$

При регулиране във втората зона $P = \text{const}$ се изпълнява условието $U_1 = \text{const}$.

Статическите преобразуватели на честота имат следната структура и принцип на действие. Трифазното напрежение на мрежата се изправя чрез изправител. Получената енергия на постоянния ток се преобразува с автономен инвертор, който захранва трифазен асинхронен двигател. Между изправителя и инвертора е свързан филтър. Той изглажда пулсациите на напрежението (при захранване на напреженов инвертор) или пулсациите на тока (при захранване на токов инвертор). Тук са разглеждани две схеми на инвертори на напрежение, които са намерили значително приложение при честотно регулиране на асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор.

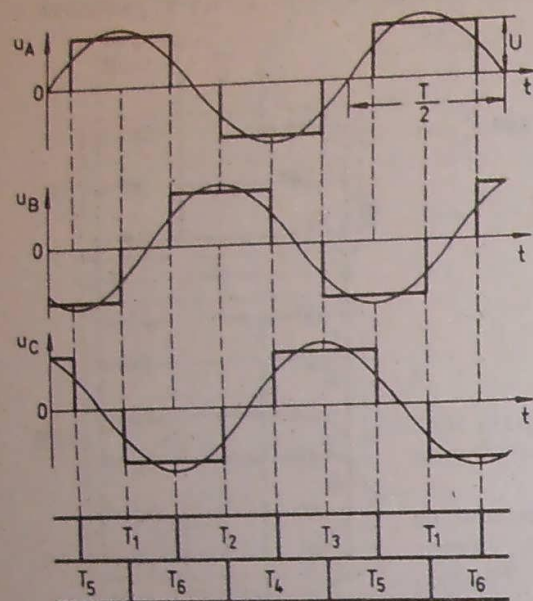
Показаният на фиг. 7.28 преобразувател на честота се състои от трифазен управляем мостов изправител ТИ и трифазен автономен инвертор ИНВ. На фиг. 7.29 са представени системата линейни напрежения и време-диаграмите за отпушване на тиристорите на инвертора. На същата фигура са показани основните хармоници на трите напрежения, които са дефазирани помежду си на $\frac{2\pi}{3}$.

Честотата се регулира чрез промяна на времето за отпушване на тиристорите, което предизвиква изменение на периода T .



Фиг. 7.28. Принципа схема на тиристорен преобразувател на честота за регулиране на асинхронен двигател

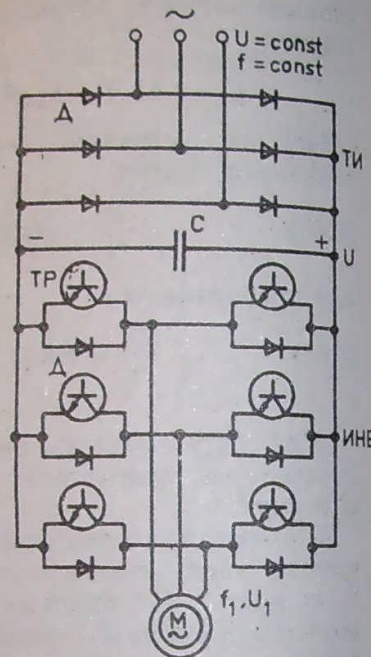
Едновременно се регулира изходното напрежение на изправителя U . Това води до изменение на ефективната стойност U_1 на основния хармоник на променливото напрежение на инвертора в съответствие със закона (7.85) или (7.86).



Фиг. 7.29. Система линейни напрежения и време-диаграми за схемата от фиг. 8.28

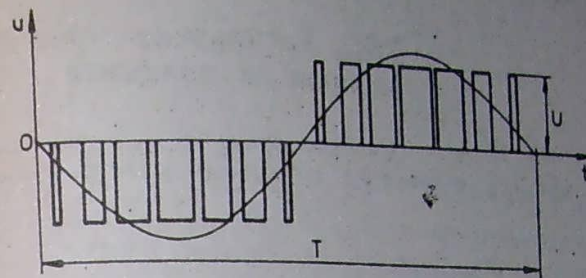
Несинусоидното напрежение, формирано от инвертора, е причина за несинусоидни токове в намотките на двигателя. Висшите времеви хармоници на токовете предизвикват електрически загуби в двигателя. В резултат к. п. д. се намалява с около 1—2%. Взаимодействието на висшите хармоници поражда пулсации на електромагнитния момент. Колебателният момент причинява неравномерно въртене на ротора, което при малки ъглови скорости влошава качеството на задвижването.

Друг тип преобразувател на честота е показан на фиг. 7.30. Изправителят е диоден, неуправляем. Следователно напрежението на междинния постояннотоков кръг има постоянна стойност $U = \text{const}$. Транзисторният инвертор дава възможност да се реализира широчинноимпульсна модулация на напрежението (ШИМ). Броят на импулсите в един полупериод се увеличава при намаляване на честотата f_1 . Широчината на импулсите във всеки



Фиг. 7.30. Принципна схема на транзисторен преобразувател на честота с ШИМ за регулиране на асинхронен двигател

полупериод е модулирана по синусоиден закон (фиг. 7.31). Поради това изходното напрежение на инвертора съдържа висши хармоници с по-малки амплитуди отколкото при схемата от фиг. 7.28.



Фиг. 7.31. Изходно напрежение на инвертора от фиг. 8.30

При инверторите с ШИМ стойността на основния хармоник на напрежението U_1 , с което е захранен асинхронният двигател, не може да се регулира с изменението на напрежението на междинния постояннотоков кръг. Тук U_1 се регулира чрез изменение на широчините на импулсите и паузите между тях, т. е. чрез изменение на запълването на импулсите, като модулацията им по синусоиден закон се запазва.

Един от показателите на регулируемите задвижвания с честотно управление на асинхронните двигатели е диапазонът на регулиране. Това е отношението на минималната към максималната честота на въртене при изпълнение на зададени условия. Типични стойности за диапазона на регулиране тук са 1 : 50, 1 : 100, 1 : 200. В зависимост от изискванията към задвижването се използват отворени и затворени системи за автоматично управление. При последните се въвеждат обратни връзки по ток и членение. При последните се прилагат се микропроцесорни системи за управление, които позволяват да се повишат точността и бързодействието на задвижването.

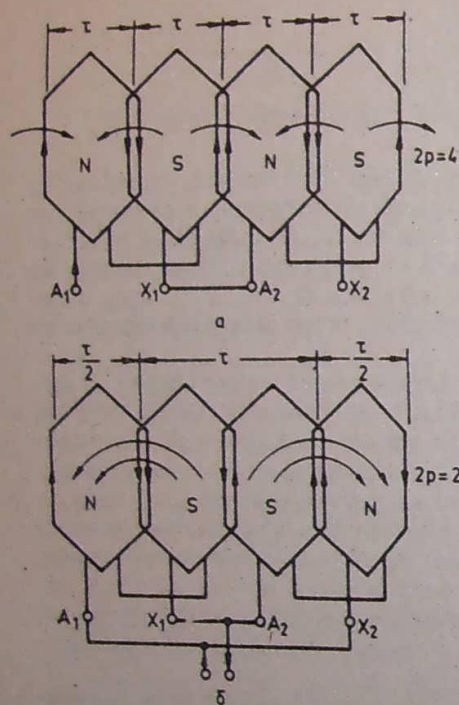
Асинхронните двигатели, предназначени за честотно регулиране, са стандартни и специални. Поради широкия диапазон на изменение на честотата на въртене при тях не може да се използва самовентилация за охлаждането на двигателите. Конструкцията им съдържа независима вентилационна система с отделен вентилатор-двигател.

В съвременните системи за честотно регулиране на асинхронните двигатели с накъсосъединен ротор цената на статичния полупроводников преобразувател е твърде висока. В този смисъл поикономически съображения задвижванията с колекторни двигатели за постоянен ток запазват своята конкурентна способност.

Въпреки това се наблюдава тенденция за изместване на постоянно-токовите двигатели с асинхронни в редица регулируеми електро-задвижвания.

7.6.2. Регулиране чрез промяна на броя на полюсите

При промяна на броя на полюсите $2p$ на статорната намотка се променят синхронната честота на въртене



Фиг. 7.32. Принципна схема на една фаза от двуслойна намотка с превключване на броя на полюсите
а— $2p=4$, б— $2p=2$

ние 4 : 1.

2. Чрез използване на една статорна намотка, чиято схема се превключва така, че да се получат различен брой полюси. Обикновено намотката се конструира за получаване на две честоти на въртене в съотношение 2 : 1, например за $2p=2$ и $2p=4$ или за $2p=4$ и $2p=8$.

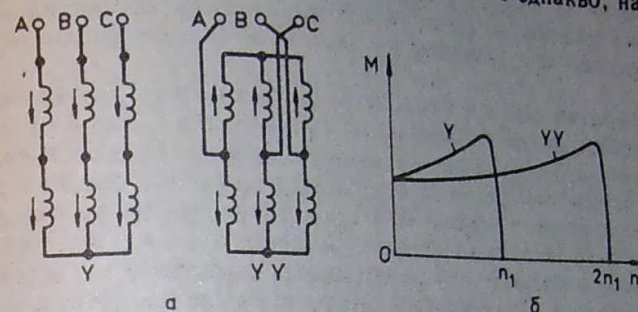
Принципно превключването на полюсите за една фаза на дву-

$$n_1 = \frac{f_1}{p}$$

и честотата на въртене на асинхронния двигател с на-късосъединен ротор. При този метод честотата на въртене се регулира стъпално. На практика се използва най-често превключване на два различни броя полюси при т. нар. двускоростни двигатели. Броят на полюсите може да бъде променен по два начина.

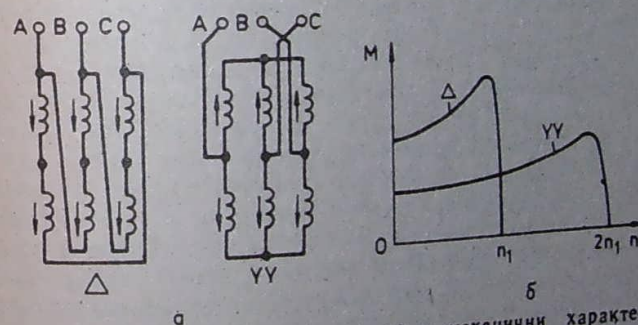
1. Чрез използване на две отделни независими намотки с различен брой полюси, положени в статорните канали. Например асинхронните двигатели за задвижване на електротелфери или асансьори могат да се изпълнят с две намотки с брой на полюсите $2p=6$ и $2p=24$. Съответните синхронни честоти на въртене са 1000 min^{-1} и 250 min^{-1} , т.е. регулирането се извършва в отноше-

слойна намотка е пояснено с помощта на фиг. 7.32. Намотката на фазата се състои от две части A_1-X_1 и A_2-X_2 с еднакъв брой секции във всяка от тях. Когато двете части са свързани последователно, така че направлението на тока в тях е еднакво, намотка-



Фиг. 7.33. Принципна схема (а) и механични характеристики (б) за регулиране при постоянен момент чрез превключване на полюсите

та възбужда магнитно поле с големия брой полюси (фиг. 7.32 а— $2p=4$). При смяна на посоката на тока в едната от двете части броят на полюсите се намалява два пъти (фиг. 7.32 б— $2p=2$). Подобно превключване се извършва и за останалите две фази, като двете части на всяка фаза се свързват паралелно.



Фиг. 7.34. Принципна схема (а) и механични характеристики (б) за превключване на статорната намотка по схемата триъгълник—двойна звезда

Честотата на въртене при двускоростните асинхронни двигатели се регулира при изпълнение на условието $M=\text{const}$ или $P=\text{const}$. Може да се покаже, че превключването на схемата на статорната намотка звезда—двойна звезда (фиг. 7.33 а) осигурява спазване на условието $M \approx \text{const}$. Тогава механичните характеристики на двигателя имат вида, показан на фиг. 7.33 б.

Превключването на статорната намотка по схемата триъгълник — двойна звезда (фиг. 7.34а) осигурява изпълнение на условието $P \approx \text{const}$. В този случай механичните характеристики са представени на фиг. 7.34 б. Кръстосването на изводите на фазите В и С е необходимо, за да се запази една и съща посока на въртене на ротора при работата на двигателя с двете различни скорости.

От казаното дотук е ясно, че за да се извърши превключването, са необходими 6 изводни края на намотката. Това води до усложняване и поскъпване на комутационната схема. Масата и цената на многоскоростните асинхронни двигатели също са по-големи в сравнение с нормалните асинхронни двигатели със същата мощност и честота на въртене. Въпреки това възможността за регулиране в редица случаи повишава качеството на задвижването и позволява да се намали разходът на електрическа енергия.

8.1. Еднофазни асинхронни микродвигатели за обща употреба

8.1.1. Принцип на действие

За силови цели (в промишлеността) се използва трифазен променлив ток, а за битови цели (в бита, в учрежденията, в обслужващата сфера и т. н.) — главно еднофазен ток. Еднофазни двигатели са тези, които се захранват от еднофазно напрежение. Въпреки че по начина на захранването са еднофазни, по устройство те не са еднофазни, а *дву-* или *трифазни*. Чисто еднофазният двигател би трябвало да има на статора си само една-единствена намотка. В действителност тези т. нар. еднофазни двигатели имат две или три разпределени статорни намотки, разместени в пространството на 90, респ. 120 ел°. Във всяко друго отношение те приличат на обикновените асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор. Този ротор се изработва най-често чрез заливане с алуминий, а по-рядко — от медни пръчки. Схематичен чертеж на еднофазен асинхронен микродвигател за обща употреба е показан на фиг. 8.1.

Известно е, че пусковият момент на еднофазния асинхронен двигател е равен на нула и двигателят не може да тръгне. Забелязано е обаче, че ако с външна сила, например тласък с ръка, роторът се завърти в някоя посока и след това външната сила се премахне, роторът няма да спре и двигателят се развърта в тази посока. След като бъде пуснат по този начин, еднофазният асинхронен двигател вече може да бъде натоварен с определен съпротивителен момент и може да развива мощност. Посоката му на въртене е посоката на първоначалния тласък.

Аналогично явление се наблюдава и при трифазния двигател, ако се прекъсне една фаза на статорната му намотка. Ако прекъсването е станало преди пускането на двигателя, той не тръгва, а ако прекъсването се е получило в движение, двигателят продължава да се върти, но вече с намалена мощност.

1 — лагер, 2 — лагерен щит, 3 — ротор, 4 — статор, 5 — вентилатор, 6 — кожух, 7 — кондензатор, 8 — изводна кутия

Всяко от двете кръгови въртящи се полета се върти спрямо неподвижния статор със синхронна ъглова скорост $\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}$. Спрямо въртящия се ротор обаче те се въртят с различ-

$$(8.1) \quad S_{np} = \frac{n_{2np}}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} : S.$$
$$(8.2) \quad S_{06} = \frac{n_{06}}{n_1} - \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} - \frac{n_1 - n}{n_1} = 2 - S.$$

158

$$(8.3) \quad M = c \Phi_A \Phi_B \sin \theta \sin \psi.$$

те в тях са дефазирани. За да се осъществи това дефазироване, едната от намотките се включва допълнителен дефазиращ елемент — резистор R_d , индуктивен елемент L_d , капацитивен елемент C_d или в общия случай импеданс Z_d . При $\psi = \frac{\pi}{2}$ полето е кръгово, при $\psi \neq \frac{\pi}{2}$ — елиптично, а при $\psi = 0$ — пулсиращо.

Обикновено двете фази не са еднакви помежду си. Те имат различен брой навивки w_A и w_B , различно сечение на проводниците и различен коефициент на намотката k_{wA} и k_{wB} . Коефициент на трансформация тук се нарича отношението

което обикновено не е равно на 1.

Импедансът на двигателя зависи от честотата на въртене n , т. е. от хлъзгането s , докато капацитетът на кондензатора не зависи от него. Затова получаването на $\psi = \frac{\pi}{2}$, а значи и получаването на кръгово поле, е възможно само за едно определено хлъзгане s . При друго хлъзгане полето става елиптично.

Всички те се захранват от еднофазна мрежа с променлив ток с честота 50 Hz. Произвеждат се за номинални напрежения 220, 127 и 110 V, с мощности до 500 W и синхронни честоти на въртене главно 3000 и 1500 min⁻¹. Употребяват се за битови цели и като помощни нерегулируеми двигатели в автоматиката и информатиката.

Устройството на всички е еднакво — двуфазни, с две разпределени статорни намотки A и B , разместени в пространството на ъгъл $\theta = \frac{\pi}{2}$. Роторът е нахъсосъединен с алуминиева или по-рядко с медна кафезна намотка. Различават се само по вида на дефазияния елемент.

Понякога еднофазните двигатели се произвеждат с вградени защитни *терморелета* — биметални или с термистори (позисто-

Figure 1 consists of three parts: (a) a schematic diagram of a relay with a normally closed contact, (b) a schematic diagram of a relay with a normally open contact, and (c) a cross-sectional view of the relay mechanism. In (a), the relay is connected to an AC source $\sim U$ through a coil $A(P)$ and a normally closed contact $B(\bar{n})$. The contact is labeled ЦБП and Z_g . In (b), the relay is connected to an AC source $\sim U$ through a coil $A(P)$ and a normally open contact $B(n)$. The contact is labeled P and Z_g . In (c), the cross-section shows the relay mechanism with components labeled 1, 2, 3, and 4. Component 1 is the coil, 2 is the contact arm, 3 is the contact, and 4 is the spring.

Фиг. 8.4. Центробежен прекъсвач

1. **Двигатели с изключваеми (пускови) дефазирани елементи.** При тях дефазираният елемент служи за пускане и след развъртането на двигателя се изключва заедно със спомагателната намотка. Изключването става с центробежен прекъсвач (фиг. 8.3 а), с токово реле (фиг. 8.3 б) или ръчно чрез специален бутон.

Устройството на центробежния прекъсвач е показано на фиг. 8.4. Контактните му тела са нормално затворени и са включени последователно на пусковата намотка *B*. Той действа по следния начин. След развъртането на вала 1 на двигателя до известна скорост, съответстваща на критичното хлъзгане s_m , тежестите 3 се раздалечават от центробежната сила и преобладавайки силата на възвратната пружина 2, отварят контактната система 4. Така се прекъсва веригата на пусковата намотка и Двигателят остава само с една включена намотка (работната) и продължава да се върти с пулсиращо поле.

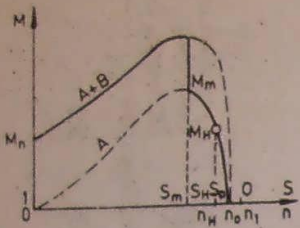
а. Однофазен асинхронен микродвигател с пускова съпротивителна намотка

Неговият дефазиращ елемент е вътрешен — пусковата намотка е изработена с повишено активно и понижено индуктивно съпротивление, като че ли последователно на пусковата намотка е включен резистор, а на работната — индуктивен елемент с разпределени параметри.

За получаване на повишено активно съпротивление се използва проводник с по-малко сечение или проводник с по-голямо сечение.

друг материал с повишено специфично електрическо съпротивление — например месинг.

Най-просто конструктивно решение дава бифиллярната намотка. При нея част от навивките на всяка секция се навива в обратна посока, а останалата — в права. Така се намалява индуктивното съпротивление, а се увеличава активното, с което се постига желаният ефект.



Фиг. 8.5. Механична характеристика на еднофазен двигател с пускова намотка

Механичната характеристика на двигателя се състои от две части (фиг. 8.5) — пускова и работна. Развъртането става по пусковата част с елиптично поле, защото работят двете намотки А и В. При $s=s_m$ става изключването на В, след което работи само намотката А. Тогава за работната част от характеристиката полето е пулсиращо.

Положително качество на двигателя е сравнително големият му пусков момент, поради което той може да се използва за средни пускови условия (когато двигателят се пуска натоварен с известен съпротивителен момент).

Друго положително качество е, че дефазираният елемент е вътрешен (разпределен), а не външен, което го прави прост и евтин.

Недостатъци на този тип двигател са голямата кратност на пусковия ток и лошите енергийни показатели. Причина за това е видът на полето — елиптично при пускане, пулсиращо при работа. Обратното поле влошава всички показатели — и пускови, и работни. Двигателят има по-малка мощност, отколкото например трифазен двигател със същите размери, като $P_{H1} \approx 0,5P_{HIII}$.

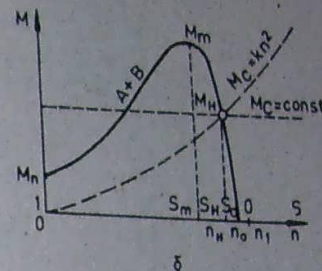
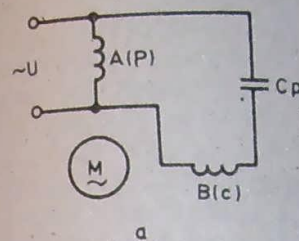
б. Еднофазен асинхронен микродвигател с пусков кондензатор

Схемата му е като на фиг. 8.3 и има същото устройство като двигателя с пускова съпротивителна намотка, само че неговият дефазиращ елемент е външен — кондензатор, който се закрепва на тялото (фиг. 8.1).

Механичната характеристика е както на фиг. 8.5. И тя се състои от две части — пускова и работна. За разлика от предишния двигател тук има възможност да се възбуди кръгово магнитно поле, но само за една точка от механичната характеристика — пусковата точка. След развъртането на двигателя когато пусковата намотка се изключи, полето се превръща в пулсиращо.

Поради пускането на двигателя с кръгово поле пусковите показатели са добри (най-добри от всички еднофазни двигатели),

почти като на трифазен двигател. Затова той се използва при тежки пускови условия (когато е натоварен). Двигателят има голям пусков момент и малък пусков ток. Работните му показатели са същите както на двигателя с пускова съпротивителна намотка.



Фиг. 8.6. Схема (а) и механична характеристика (б) на еднофазен двигател с работен кондензатор

2. Двигатели с постоянно включени (работни) дефазиращи елементи. При тях дефазираният елемент е включен постоянно към спомагателната намотка. Двигателят работи с двете си намотки както при пускане, така и при продължителна работа. Като дефазиращ елемент се използва кондензатор.

а. Еднофазен асинхронен микродвигател с работен кондензатор
Схемата на този двигател е показана на фиг. 8.6 а.

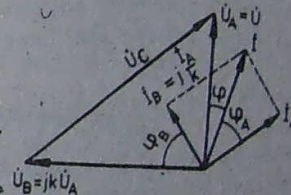
Спомагателната намотка е с повече навивки и има по-голямо съпротивление. През нея тече по-малък ток, но върху нея се пада по-високо напрежение.

Механичната характеристика на двигателя е показана на фиг. 8.6 б. Тя е само една както при трифазните двигатели. И тук кръгово магнитно поле се получава само за една точка от нея — точката при номинален товар. За всички останали натоварвания полето е елиптично. Затова този двигател има добри работни и лоши пускови показатели.

В сравнение с трифазен двигател мощността на двигателя е $P_{H1} \approx P_{HIII}$.

Векторната диаграма на двигателя е дадена на фиг. 8.7.

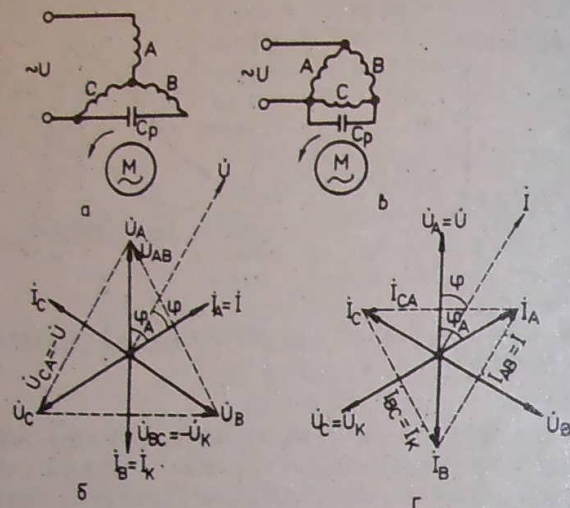
б. Еднофазен асинхронен микродвигател с малка мощност. Той представлява трифазен асинхронен двигател като по принцип, за да работи един трифазен двигател като еднофазен, може да му се постави какъвто е дефазиращ елемент — R, L или C, но най-добре е C. Така че двигателят трябва



Фиг. 8.7. Векторна диаграма на кондензаторен двигател

да се причисли към еднофазните двигатели с постоянно включени дефазиращи елементи.

Въпросът се свежда до това, как може трифазен двигател да се използва в еднофазна мрежа. От съществуващите много схеми



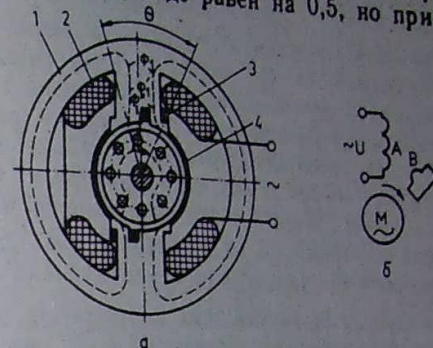
Фиг. 8.8. Схеми и векторни диаграми при свързване на трифазен двигател в еднофазна схема а, б — при свързване Y; в, г — при свързване в Δ

най-голямо разпространение са получили схемите на фиг. 8.8 — свързване Y или Δ. Двигателят е симетричен, двете схеми са трипроводни и са удобни за реверсиране, като кондензаторът се прехвърля от една фаза към другата. Разбира се, може да се реверсира и чрез кръстосване на две от фазите.

При избора на схемата за еднофазна работа от значение е напрежението на *еднофазната мрежа* U . При свързване в Y то трябва да бъде равно на линейното напрежение на трифазния двигател, а при свързване в Δ — на фазовото. Например, ако $U_L = 380\text{ V}$, $U_\phi = 220\text{ V}$. Тогава, ако напрежението на еднофазната мрежа е $U = 220\text{ V}$ и двигателят при трифазно захранване е бил свързан в Y, при еднофазно трябва да се пресвърже в Δ.

За да може трифазният двигател, захранван от еднофазна мрежа, да работи в оптимален симетричен режим, необходимо е в него да съществува кръгово въртящо се магнитно поле. Това се осъществява, ако напреженията и токовете му образуват същата симетрична система като при захранване от трифазна мрежа. Както се вижда от векторните диаграми на фиг. 8.8 б за свързване в Y и фиг. 8.8 г за свързване в Δ, симетричната система се получава с помощта на дефазиращия кондензатор само при условие, че $\varphi_A = 60^\circ$. Това следва от изискването токът на кондензатора

I_K винаги да изпреварва напрежението U_K върху него на 90° . Щом $\varphi_A = 60^\circ$, значи коефициентът на мощността на двигателя, захранен от трифазна мрежа, е $\cos\varphi = 0,5$. От друга страна, $\cos\varphi$ товар, по-малък от номиналния. Следователно при захранване на двигателя от еднофазна мрежа той може да работи с кръгово поле само с този товар, при който $\cos\varphi$ при захранването му от трифазна мрежа е бил равен на 0,5. Именно за този $\cos\varphi$ се изчислява капацитетът на работния кондензатор. Обикновено мощността при еднофазна работа може да достигне 0,7—0,9 от мощността при трифазна работа.



Фиг. 8.9. Еднофазен двигател с екранирани полюси

а — принципно устройство; б — условна схема

3. *Еднофазни асинхронни микродвигатели с екранирани полюси.* Тези двигатели се наричат още двигатели с накъсосъединени навивки върху полюсите или двигатели с разцепени полюси. Те имат просто устройство. Роторът на двигателя е накъсосъединен както на всички асинхронни микродвигатели. Статорът е явнополюсен (фиг. 8.9 а). Върху полюсите на статора 1 е поставена главната намотка 2, която се включва към захранващото напрежение. Върху полюсия крайник на всеки полюс в канале е поставена втора намотка (екраниращата 3), която обхваща част от полюса и е съединена накъсо. Тя представлява медна или алуминиева шина и се състои само от една навивка, така че този двигател по устройство е двуфазен и спада към двигателите с постоянно включени дефазиращи елементи. Функцията на вършен дефазиращ елемент се изпълнява от накъсосъединената намотка. Двигателят има различна конструктивни изпълнения на статорната система (кръгла, квадратна, симетрична или несиметрична). Схемата му е показана на фиг. 8.9 б. Както се вижда, този двигател прилича до известна степен на екраниран променливотоков електромагнит.

Двигателят е пространствено несиметричен, защото двете фази са разместени в пространството на ъгъл $\theta < \frac{\pi}{2}$. Този ъгъл се получава между магнитните оси на двете намотки, т. е. между средите на екранираната и неекранираната част от полюса. За да се възбуди въртящо се магнитно поле, е необходимо потоците,

преминаващи през тези части, да бъдат дефазирани във времето на някакъв ъгъл. От фигурата личи, че магнитният поток Φ_1 , създаван от намотката А, се разделя на два потока, разместени пространствено на ъгъл θ — поток Φ_1' през неекранираната част и Φ_1'' — през екранираната. Φ_1' се влита в навивките на главната намотка А, а Φ_1'' — в двете намотки — главната А и екраниращата В, които са индуктивно свързани помежду си, тъй като са на общ магнитопровод. Намотката А изпълнява функцията на първична намотка на трансформатор, а намотката В — на вторична намотка, която е конструктивно съединена на късо. Тогава в нея се индуцира е. д. н. E_k , прокарващо ток I_k , който създава поток Φ_k , насочен срещу създаващия го Φ_1' като се стреми да го отслаби. В това се проявява екраниращото действие на накъсосъединената навивка — тя е магнитен екран. Накрая се получава един резултантен поток през екраниращата част Φ_e , дефазирен спрямо Φ_1' и Φ_1'' на ъгъл ψ . Двата потока Φ_1' и Φ_e образуват въртящо се магнитно поле, което е елиптично, тъй като $\Phi_1' \neq \Phi_e$ и $\theta + \psi \neq \pi$. Съгласно с (8.3) моментът е значително по-малък от момента на другите еднофазни двигатели, при които $\theta = \frac{\pi}{2}$, а ако полето е кръгово, и $\psi = \frac{\pi}{2}$.

Механичната характеристика е подобна на характеристиката на еднофазния двигател с работен кондензатор, но полето е елиптично за цялата характеристика. Особеното тук е, че характеристиката има забележим провал при честотата на въртенето около $\frac{n_1}{3}$.

Той се дължи на паразитния асинхронен момент от висшите пространствени хармоници на магнитното поле и главно на третия хармоник. За отслабването му е необходимо магнитната индукция да се доближи по форма до синусоидата. Това се постига, като краищата на полюсите се шунтират с магнитни шунтове 4, които увеличават магнитната проводимост в пространството между тях. Твърде малкият пусков момент и наличието на провал в характеристиката правят двигателя пригоден само за леки пускови условия. Използва се често в маломощни вентилатори.

Положителните качества на този двигател са главно простото му устройство и лесната технология на изработване, които го правят евтин, непретенциозен и сигурен при експлоатация. Освен това има малка кратност на пусковия ток, поради което, ако бъде застопорен, може да издържи продължително време, без да се повреди.

Недостатъци на този двигател са ниските му енергийни показатели поради силната елиптичност на полето.

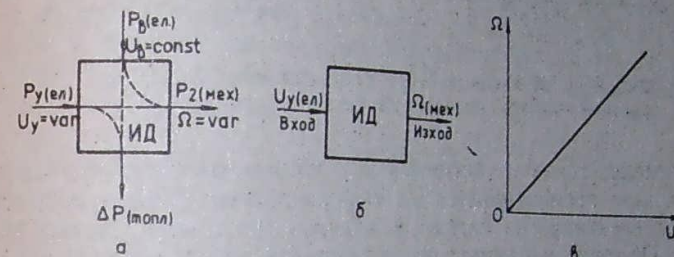
Основен недостатък на двигателя с екранирани полюси е, че е нереверсивен — върти се само в една посока — от неекранираната част на полюса към екранираната.

8.2. Изпълнителни асинхронни микродвигатели

8.2.1. Общи сведения

Под термина *изпълнителен двигател*, наричан още *управляем*, *регулируем* или *серводвигател*, се разбира двигател, ъгловата скорост на който може да се регулира плавно в широки граници.

Изпълнителните двигатели се употребяват в автоматиката, информатиката, робототехниката и т. н.



Фиг. 8.10. Блок-схеми на изпълнителен двигател

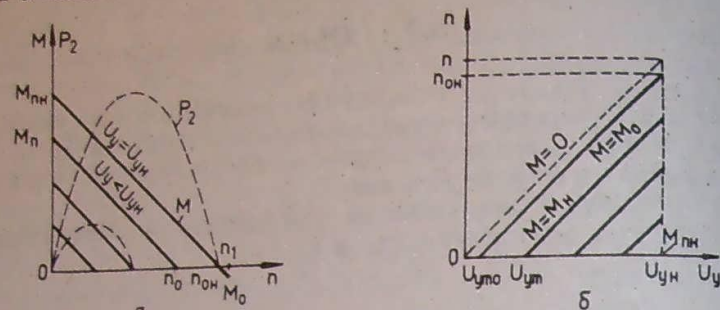
а — преобразувател на енергия; б — преобразувател на информация

Обикновените асинхронни двигатели за обща употреба не са изпълнителни, защото ъгловата им скорост трудно може да се регулира. Те също се използват в автоматиката, но като самостоятелни двигатели. Изпълнителният двигател е необходим в затворената следяща система за автоматично регулиране или управление на обекти и е елемент на аналоговата техника.

Изпълнителният двигател има две намотки — възбудителна В и управляваща (регулираща) У. На възбудителната намотка се подава константно по стойност възбудително напрежение U_b , а на управляващата — изменяемо управляващо (регулиращо) напрежение (управляващ сигнал) U_y тогава, когато е необходимо двигателят да се завърти. В резултат на измененията на U_y честотата на въртене на двигателя n се изменя пропорционално на напрежението. При това в общия случай двигателят може да бъде променливотоков или постоянен ток.

На фиг. 8.10 са показани блокови схеми на изпълнителния двигател като елемент на автоматиката. Блоквата схема от фиг. 9.10 а дава представа за потока на мощността или енергията, третирайки двигателя като силов орган — преобразувател на енергията. От тази гледна точка изпълнителният двигател, както и всеки друг двигател, преобразува електрическата мощност в механична. Електрическата мощност се консумира чрез двете на-

мотки В и У, при което P_e се получава директно от електрическата мрежа, а P_y — през усилвател на мощност. След като се отдели известни загуби ΔP , електрическата мощност се преобразува в механична мощност на вала.



Фиг. 8.11. Механични (а) и регулационни (б) характеристики на изпълнителен двигател

От гледна точка на автоматиката изпълнителният двигател се приема като преобразувател на информацията. Той преобразува входния електрически сигнал в изходен механичен сигнал (фиг. 8.10 б). По-точно изпълнителният двигател преобразува и а преженето в ъглова скорост, за която е желателно да се изменя пропорционално на него (фиг. 8.10 в).

Основните характеристики на един изпълнителен двигател са механичните (фиг. 8.11а) и регулационните (фиг. 8.11б). За един изпълнителен двигател е желателно те да са линейни и паралелни за устойчивостта на системата.

Механичните характеристики са семейство зависимости $M = f(n)$ при $U_y = \text{const}$ и $U_e = \text{const}$.

Всяка механична характеристика има две важни точки — пусковия момент M_n при $n=0$ (при късо съединение) и честотата на въртене n_0 при $M=0$ (при идеален празен ход).

Регулационните характеристики са семейство зависимости $n = f(U_y)$ при $M = \text{const}$ и $U_e = \text{const}$. Те дават представа за плавноста и пропорционалността на регулирането. При изпълнителните двигатели с увеличаване на управляващото напрежение ъгловата скорост трябва да нараства (и обратно), а когато управляващото напрежение е равно на нула (при константно възбудително напрежение), трябва и ъгловата скорост да бъде равна на нула. Ако при $U_y=0$ и $U_e \neq 0$ двигателят продължава да се върти, това означава, че той има самоход, който е недопустим.

Всяка регулационна характеристика има една важна точка — т. нар. напрежение на тръгване или на спиране (които са равни). Това е стойността на управляващото напрежение U_{yt} , при която при даден съпротивителен момент двигателят тръгва или спира.

При идеален празен ход, когато триенето се пренебрегва, напрежението на тръгване е теоретично равно на нула. При реален празен ход двигателят е вътрешно натоварен с момента на собствено си триене M_0 и U_{yt0} е различно от нула, но все пак е малко — няколко процента от номиналното. Напрежението на тръгване при реален празен ход се нарича нулева грешка, чувствителност, праг на чувствителност или зона на нечувствителност (хистерезис) на изпълнителния двигател. Когато двигателят е натоварен с някакъв съпротивителен момент, той тръгва при по-голямо напрежение $U_{yt} > U_{yt0}$.

От фигурите личи, че тъй като моментът от триене $M_0 > 0$, честотата на въртене на реален празен ход n'_0 е по-малка от тази при идеален празен ход n_0 . Моментът M_0 може да се отчете от механичната характеристика при номинално напрежение, ако тя се продължи в областта на отрицателните моменти до пресичането ѝ с правата, спусната от точката n_0 . Тогава, ако характеристиките са линейни, уравнението им е

$$(8.4) \quad \frac{n}{n_0} = 1 - \frac{M}{M_n}$$

и

$$(8.5) \quad \frac{M}{M_n} = \frac{U_{yt}}{U_{yn}}$$

където електромагнитният момент е $M = M_2 + M_0$.

Твърде често M_0 се пренебрегва като много малък в сравнение с M_n (няколко процента), затова при теоретичното разглеждане за опростяване на анализа може да се допусне, че M_0 е включен към външния съпротивителен момент M_2 .

Важен показател на характеристиките е техният наклон, т. е. стръмността им. Характеристиките на реалните изпълнителни двигатели не са линейни и затова те са с променлива стръмност. Стръмността (твърдостта) на дадена механична характеристика се нарича още коефициент на вътрешно демпфиране (затихване) или коефициент на вискозно триене.

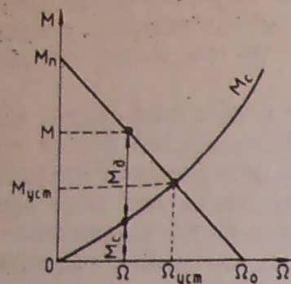
8.2.2. Динамика на изпълнителния двигател

Изпълнителните двигатели работят главно в преходен (динамичен) режим, който се изследва с помощта на диференциалното уравнение на движението на ротора, описващо механичния преходен процес;

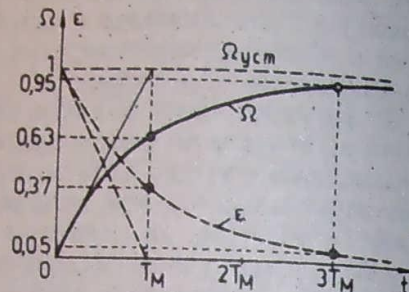
$$(8.6) \quad M = M_c + M_d$$

Тук M е двигателният момент, M_c — товарният съпротивителен момент, а M_d — динамичният момент, под чието действие стават развъртането, спирането и вобще всяка промяна на ъгловата скорост. При установен (статичен) режим на работа $M_d = 0$, а $M = M_c$, докато в преходен (динамичен) режим $M_d \neq 0$. От своя страна

$$(8.7) \quad M_d = J\varepsilon = J \frac{d\Omega}{dt},$$



Фиг. 8.12. Към уравнението на механичните характеристики



Фиг. 8.13. Изменение на механичните величини през време на преходния процес

където J е масовият инерционен момент на ротора и всички въртящи се маси, присъединени към него, а ε — ъгловото ускорение.

От уравнението на механичната характеристика (8.4) и от фиг. 8.12 в преходен и в установен режим се получава:

$$(8.8) \quad \frac{M}{M_n} = 1 - \frac{\Omega}{\Omega_0},$$

$$(8.9) \quad \frac{M_{уст}}{M_n} = 1 - \frac{\Omega_{уст}}{\Omega_0}.$$

Като се има предвид, че $M_c = M_{уст}$, и се раздели основното уравнение на движението (8.6) на M_n и като се заместят в него горните зависимости, се получава

$$(8.10) \quad T_M \frac{d\Omega}{dt} + \Omega = \Omega_{уст},$$

където T_M е механичната (електромеханичната) времеконстанта на двигателя:

$$(8.11) \quad T_M = J \frac{\Omega_0}{M_n}.$$

Решението на (8.10) е

$$(8.12) \quad \Omega = \Omega_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}} \right).$$

Това уравнение дава изменението на ъгловата скорост при развъртане на двигателя, когато напрежението нараства скокообразно от $U_y = 0$ до някаква стойност $U_y = \text{const}$.

За преходния процес е важно и ъгловото ускорение

$$(8.13) \quad \varepsilon = \frac{d\Omega}{dt} = \frac{\Omega_{уст}}{T_M} e^{-\frac{t}{T_M}} = \varepsilon_{нач} e^{-\frac{t}{T_M}}.$$

Ако преходният процес протича при празен ход ($\Omega_{уст} = \Omega_0$), началното ускорение е равно на максималното теоретично ъглово ускорение:

$$(8.14) \quad \varepsilon_{нач} = \frac{\Omega_0}{T_M} = \varepsilon_m = \frac{M_n}{J}.$$

То се нарича още динамична доброкачественост на двигателя.

На фиг. 8.13 са показани графиките на ъгловата скорост и ъгловото ускорение при развъртане. Ако характеристиките на двигателя в идеалния случай са линейни, тези графики са експоненти.

Времеконстантата T_M е времето, за което двигателят се развърта до ъглова скорост, равна на $0.63 \Omega_{уст}$. Пълно развъртане или спиране настъпва теоретично при $t = \infty$, затова е прието, че времето за завършване на преходния процес $t_{уст}$ позволява ъгловата скорост да достигне стойност $0.95 \Omega_{уст}$, респ. $0.05 \Omega_{уст}$. Това време е $t_{уст} = 3T_M$. Ето защо T_M характеризира бързодействието (пъргавината) на двигателя.

8.2.3. Управление на асинхронните изпълнителни микродвигатели

По устройство асинхронните изпълнителни двигатели приличат на обикновените асинхронни микродвигатели за обща употреба. Те имат две статорни намотки, разположени в пространството под ъгъл $\theta = \frac{\pi}{2}$. Едната от тях е

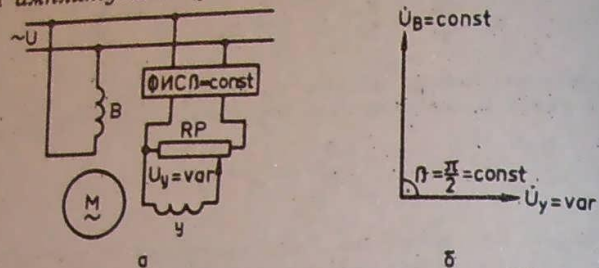
управляващата U , а другата — възбудителната B .

Управлението на асинхронните изпълнителни двигатели се извършва чрез промяна на вида на магнитното поле. Това се постига чрез създаване на несиметрия в системата на токовете и напреженията, което води до появяване на обратно въртящо се поле, създаващо вътрешен съпротивителен момент. Този момент натоварва ротора и намалява ъгловата скорост. Когато магнитното поле е кръгово, ъгловата скорост е максимална. Когато полето е пулсиращо, ъгловата скорост е нула, а когато полето е елиптично, ъгловата скорост има някаква междинна стойност. При промяна на вида на полето то се мени между кръгово, елиптично и пулсиращо, съответно ъгловата скорост се изменя от максималната (синхронната) до нула поради значителните загуби на мощност.

В зависимост от начина на захранване и начина за регулира-

не на ъгловата скорост се различават различни видове управление и схеми за създаване на несиметрия.

1. Амплитудно управление. При амплитудно управление се променя амплитудата (респ. ефективната стойност) на управля-



Фиг. 8.14. Схема (а) и векторна диаграма (б) при амплитудно управление

вашото напрежение U_y , докато фазовата му разлика β спрямо възбудителното напрежение U_n остава постоянна и равна на $\frac{\pi}{2}$.

Необходимото дефазиране $\beta = \frac{\pi}{2}$ между двете напрежения се осъществява със специална фазоизместваща схема (ФИС) — т. нар. фазовъртящ мост (фиг. 8.14 а). Често тя е част от електронния усилвател, който захранва управляващата намотка. Фазоизместващата схема представлява съчетание от активни, индуктивни и капацитивни елементи, свързани така, че да осигурят $\beta = \frac{\pi}{2}$ (фиг. 8.14 б). Това може да се постигне по-лесно, ако двигателят се захранва от трифазна система с изведена неутрала. Към едната намотка (например В) се подава линейно напрежение U_{AB} , а към другата (У) — срещуположното му фазово напрежение U_C . Двете напрежения са дефазирани на ъгъл $\beta = \frac{\pi}{2}$. Големините на двете напрежения могат да се регулират или да се поддържат постоянни с помощта на два потенциометъра.

Когато $\beta = \frac{\pi}{2}$ и $\frac{U_y}{U_n} = \frac{\omega_y k_{wy}}{\omega_n k_{wn}} = \frac{1}{k}$, напреженията U_y и U_n образуват двуфазна симетрична система. Тогава магнитното поле е кръгово. Отношението $\alpha = \frac{U_y}{U_n}$ се нарича коефициент на сигнала. По-важен е т. нар. ефективен коефициент на сигнала $\alpha_e = -k\alpha$. Когато $\alpha_e = 1$, полето е кръгово; когато $\alpha_e = 0$, то е пулсиращо, а при $\alpha_e = 0 \div 1$ то е елиптично.

2. Фазово управление. При този вид управление се променя

фазата β на U_y спрямо U_n , докато големината му остава постоянна ($U_y = \frac{U_n}{k}$).

Регулируемата фазова разлика β се получава също с помощта на фазоизместваща схема (фазорегулатор), която позволява β да се изменя от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Ефективният коефициент на сигнала тук е $\sin \beta$. При $\beta = 0$ полето е пулсиращо; при $\beta = \frac{\pi}{2}$ — кръгово, а при $\beta = 0 \div \frac{\pi}{2}$ — елиптично.

3. Амплитудно-фазово управление. При този вид управление се изменят едновременно амплитудата U_y и фазата β на управляващото напрежение. В общия случай изменението на U_y и β поотделно и независимо едно от друго е практически трудно. Затова в частния случай на амплитудно-фазово управление се прилага изменение само на амплитудата на U_y , а фазата му β като следствие се променя във функция от ъгловата скорост Ω , т. е. в крайна сметка пак от U_y . В най-простия случай това се постига, като се употреби еднофазен кондензаторен двигател (фиг. 8.15 а). Кондензаторът се включва последователно на възбудителната намотка, а на управляващата намотка се подава изменящото се управляващо напрежение.

От векторната диаграма (фиг. 8.15 б) се вижда, че

$$U = U_n + U_C = \text{const.}$$

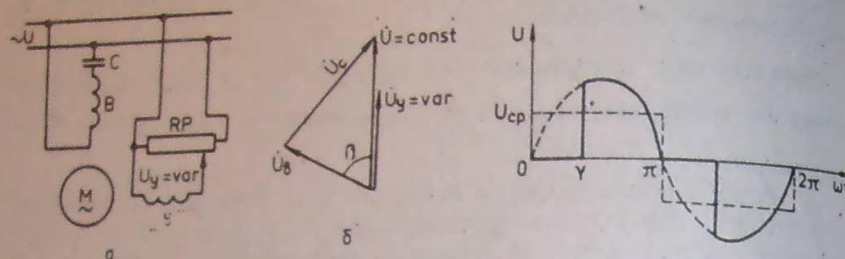
Когато се измени U_y , изменя се ъгловата скорост, а оттам и токовете I_y и I_n , както и падът на напрежение в кондензатора U_C . Изменя се и напрежението на самата възбудителна намотка U_n , при което вътрешният ъгъл на дефазиране β също се изменя. Така че управлението изглежда амплитудно, а всъщност е амплитудно-фазово.

Коефициентът на сигнала в този случай е α , а ефективният коефициент на сигнала — $\frac{\alpha}{\alpha_0}$. Тук α_0 е коефициент на сигнала, при който двигателят има кръгово поле. Това е възможно само за една точка от механичната характеристика — пусковата.

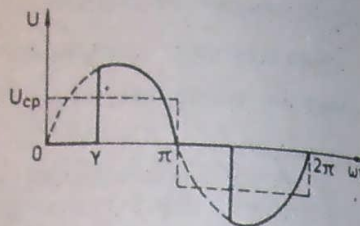
При $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 1$ полето е кръгово; при $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 0$ — пулсиращо, а при $\frac{\alpha}{\alpha_0} = 0 \div 1$ — елиптично.

Ако се сравнят тези три вида управление помежду си, се вижда, че най-лесноосъществимо е амплитудно-фазовото, затова то е най-разпространено. Линейни характеристики дава амплитудното, а нелинейни — амплитудно-фазовото. Най-трудноосъществимо е фазовото, затова то се употребява рядко.

4. *Честотно (честотно-импулсно) управление.* Чрез статичен полупроводников транзисторен или тиристорен преобразувател се изменя плавно честотата на двете захранващи напрежения, така че $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$ (вж. глава VII).



Фиг. 8.15. Схема (а) и векторна диаграма (б) при амплитудно-фазово управление



Фиг. 8.16. Импулсно управление

Характерно за напрежението, създавано от такъв преобразувател, е, че формата му не е синусоидна, а почти правоъгълна или трапецовидна — секспоненциален фронт и тил на импулсите, което създава вредни явления в работата на двигателя, като допълнителни загуби, вибрации и шум.

5. *Импулсно (широчинно-импулсно или параметрично) управление.* Също чрез полупроводников преобразувател се изменя широчината (запълването) на полувалята на двете или само на едно то напрежение — фиг. 8.16.

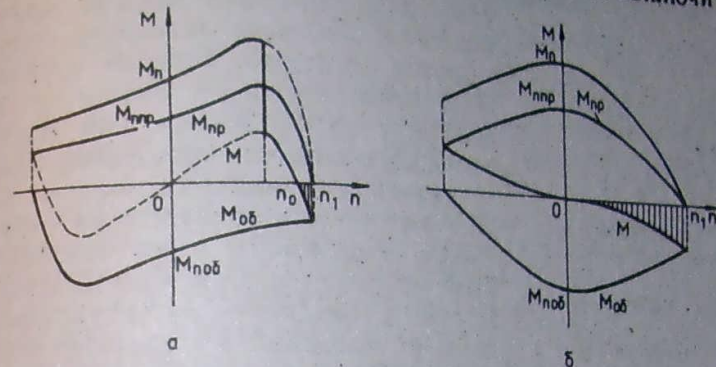
Честотата на въртене е пропорционална на средната стойност на напрежението, а тя от своя страна зависи от ъгъла на отпушване γ , което е всъщност относителната продължителност на импулса или коефициентът на запълване на импулса.

Този начин на регулиране е много перспективен и все повече се прилага, поради това че регулирането е плавно и практически беззагубно.

8.2.4. Самоход и характеристики на асинхронните изпълнителни двигатели

Самоходът на изпълнителните двигатели е абсолютно недопустим. Асинхронните изпълнителни двигатели биха имали самоход, ако продължават да се въртят и след изключване на една от намотките им. Този самоход се нарича електромагнитен или параметричен. За неговото отстраняване конструктивно се увеличава активното съпротивление на роторната намотка. При това критичното хлъзгане (което обикновено

е $s_m = 0,2-0,3$) се увеличава до $s_m = 3-4$. На фиг. 8.17а са показани механичните характеристики на двигател с критично хлъзгане $s_m = 0,3$. Най-горната крива се получава, когато работят двете намотки В и У, а средната — когато се изключи У, а



Фиг. 8.17. Към обяснението на самохода

а — двигател с нормално съпротивление на ротора; б — двигател с увеличено съпротивление на ротора

остане включена само В. При първата полето е кръгово, а при втората — пулсиращо. Тъй като полето се разлага на две полета (право и обратно), техните характеристики се разполагат от двете страни на резултантната.

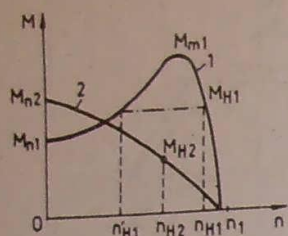
Ако се увеличи активното роторно съпротивление например 3 пъти, s_m се увеличава също толкова пъти (вж. глава седма). Максимумите на всички моменти, съответстващи на кръгови полетата, се преместват, но остават същите по големина (фиг. 8.17 б). Тогава в работната област $s=1 \div 0$, т. е. $n=0 \div n_1$, моментът на обратното поле става по-голям от този на правото и резултантният момент става изцяло отрицателен (спирачен). Това означава, че щом се изключи едната от намотките, двигателният момент се превръща в спирачен и двигателят бързо спира.

Понякога в изпълнителните двигатели може да се появи т. нар. технологичен самоход. Той се проявява в това, че веднага след включването на намотката В двигателят тръгва, или пък не спира, като се изключи У, независимо че активното съпротивление на ротора е увеличено и електромагнитният самоход е премахнат. Причините за този самоход са технологични — дължат се на недостатъчно прецизното изработване на двигателя, което може да създаде електрическа или магнитна несиметрия.

Силното повишаване на активното съпротивление на ротора има и други благоприятни последици — фиг. 8.18. От двузначни с неустойчива зона (крива 1) механичните характеристики стават еднозначни и изцяло устойчиви (крива 2). Двузначна е прието да се нарича характеристиката, която има максимум. Тогава при един и същ момент двигателят може да има две различни

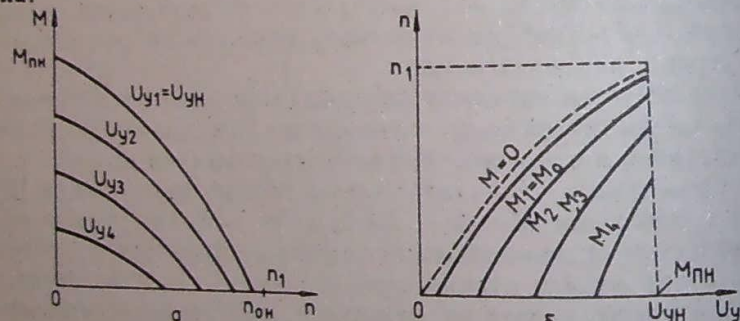
ъглови скорости: едната в устойчивата, а другата — в неустойчивата зона. Така характеристика е непригодна за целите на автоматичното регулиране.

Освен това от фигурите може да се заключи, че механичните и регулационните характеристики се доближават до идеалните линейни характеристики толкова повече,



Фиг. 8.18. Механични характеристики на обикновен 1 и на изпълнителен 2 асинхронен двигател

когато е увеличено активното съпротивление на ротора. Така се увеличава и диапазонът на регулиране на ъгловата скорост. Въобще при всички променливотокови микромашини основна причина за *нелинейността* на характеристиките е наличието на *индуктивни* съпротивления на намотките. Като се увеличават активните съпротивления, влиянието на индуктивностите се намалява и реалните нелинейни характеристики се доближават до идеалните линейни характеристики.



Фиг. 8.19. Механични (а) и регулационни (б) характеристики на асинхронен изпълнителен двигател

На фиг. 8.19 са показани типични *механични* и *регулационни* характеристики на асинхронни изпълнителни двигатели. В зависимост от вида на управлението те са до известна степен *нелинейни* и *неуспоредни*.

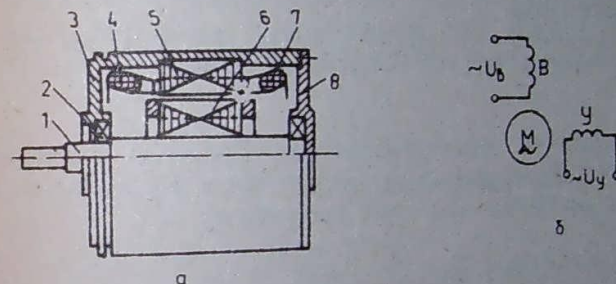
Едно изкуствено „псевдо“ *линеаризиране* на регулационните характеристики се постига, като изпълнителните двигатели се проектират за повишена честота — 400, 500, 800, 1000 Hz. Тогава синхронната им честота на въртене се увеличава до 24 000, 30 000, 48 000, 60 000 min^{-1} . При нормален диапазон на регулиране на честотата на въртене до 3000 min^{-1} двигателят работи в начал-

ната, практически линейна част на характеристиката. От друга страна, високочестотните машини са по-леки и по-малки от нискочестотните.

8.2.5. Видове асинхронни изпълнителни микродвигатели

Асинхронните изпълнителни двигатели се изработват обикновено за номинални напрежения 127, 110, 36V; честота 50, 60, 400, 500, 800, 1000 Hz и мощност от части от W до 50 W.

1. *Асинхронен изпълнителен микродвигател с обикновен късосъединен (кафезен) ротор*. По устройство и принцип на действие този двигател прилича на обикновен асинхронен микродвигател за обща употреба. Разликата е само, че активното роторно съпротивление на изпълнителния двигател е значително *повишено* спрямо съпротивлението на двигателя за обща употреба.



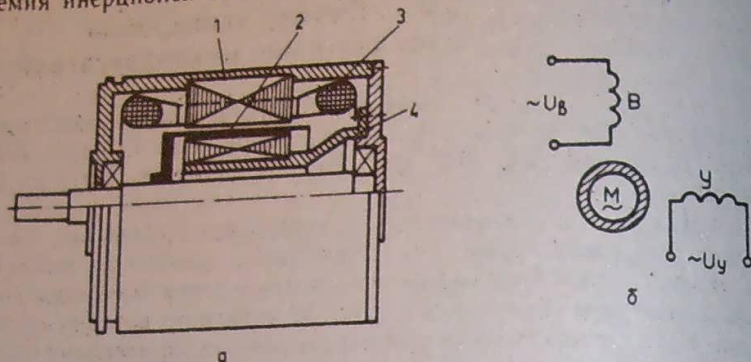
Фиг. 8.20. Асинхронен изпълнителен микродвигател с обикновен кафезен ротор
а — принципно устройство; 1 — вал, 2 — лагер, 3 — тяло, 4 — статорна намотка, 5 — статорен пакет, 6 — роторен пакет, 7 — роторен кафез, 8 — лагерен щит; б — условна схема

Типична конструкция на асинхронен изпълнителен двигател с обикновен *накъсосъединен* ротор е показана на фиг. 8.20 а, а електрическата му схема — на фиг. 8.20 б.

Тъй като изпълнителните органи, които се задвижват от над 1000 min^{-1} , а изпълнителят винаги работи с *понижаващ* механичен *редуктор*. Много често двигателят и редукторът са обединени конструктивно. Също така двигателят понякога се обединява конструктивно с *демпфер* (успокоител на колебанията на скоростта), който може да бъде *инерционен* или *електромагнитен*.

Изпълнителният двигател с обикновен *накъсосъединен* ротор се употребява там, където не е необходимо *бързодействие*.

например при топлинните и при някои химични процеси. Неговата механична и електрическа времеконстанта са сравнително големи. Голямата механична времеконстанта T_M се дължи на големия инерционен момент на ротора, който има значителна маса,



Фиг. 8.21. Асинхронен изпълнителен микродвигател с кух немагнитен ротор
а — устройство: 1 — статор, 2 — ротор, 3 — вътрешен статор, 4 — носеща втулка; б — условна схема

защото е изработен от стомана и мед. Голямата електрическа времеконстанта T_E се дължи на значителните индуктивни съпротивления на двигателя при късо съединение:

$$T_E = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}$$

2. Асинхронен изпълнителен микродвигател с кух немагнитен ротор. Принципно устройство на двигателя е показано на фиг. 8.21 а, а схемата му — на фиг. 8.21 б. Роторът на този двигател е кух немагнитен чашковиден и представлява тънкостенна чаша от алуминиева сплав (дуралуминий). На ротора няма никаква намотка. Въртящият момент се създава от взаимодействието на статорното магнитно поле с вихровите токове в немагнитния ротор, индуцирани от него — принцип на Ферарис (както при електромерите). Въобще моментът от вихровите токове е също асинхронен по характер, само че вихровите токове не са канализирани в проводниците на някаква намотка, а са разпръснати по целия обем на ротора.

С употребата на алуминиев материал се преследват две цели. От една страна, алуминият е лек, а и чашата е тънкостенна (0,2—1 mm) и лека, което води до малък инерционен момент на ротора. По такъв начин механичната времеконстанта на двигателя е много малка — около 10 пъти по-малка от времеконстантата на двигателя с обикновен накъсосъединен ротор. Той се използва там,

където е необходимо голямо бързодействие — в летателните и космическите апарати.

От друга страна, алуминият е немагнитен метал, поради което индуктивното съпротивление на разсейване на ротора е незначително и може да се пренебрегне, защото потокът на ротор-вателно е пренебрежимо малък. По този начин общата индуктивна времеконстанта и характеристиките стават по-близки до линейните.

Увеличението на активното съпротивление на ротора, което е необходимо, за да се превърне двигателят в управляем изпълнителен съпротивление на дуралуминия е по-голямо от съпротивлението на медта, а и чашата се прави достатъчно тънка.

Принципна особеност на конструкцията на този двигател е, че той има два статорни пакета — външен и вътрешен. На външния са разположени статорните намотки, а вътрешният е цилиндрично ядро без канали и намотки. Той служи само за магнитопровод — да намали магнитното съпротивление за основния магнитен поток, който минава през ротора. Вътрешният статорен пакет се носи от специален цилиндричен издатък на лагерния щит.

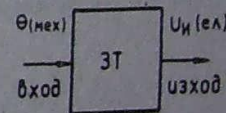
8.3. Завъртащи се трансформатори

8.3.1. Общи сведения

Завъртащият се трансформатор представлява информационна микромашина за променлив ток, която преобразува ъгъла на завъртане в електрическо напрежение (фиг. 8.22). Употребява се в автоматиката, аналоговата и цифровата техника за извършване на изчислителни операции и в следящите системи. Нарича се още *резолвер*.

По устройство завъртащият се трансформатор представлява двуфазен асинхронен микродвигател с навит ротор и контактни пръстени (фиг. 8.23 а). На статора и на ротора му има по две намотки, разделени в канали и разположени на 90 ел. една спрямо друга, които най-често са еднакви помежду си (фиг. 8.23 б). Краищата на двете роторни намотки са изведени на четири контактни пръстена с четки. Четките и пръстените са метални — от твърда сребърна сплав, която осигурява малко преходно съпротивление на контакта.

В зависимост от функционалната зависимост между изходното напрежение U и пространствения ъгъл на завъртане θ завъртащите се трансформатори са синус-косинусни, линейни, построителни, машабни и др. Принципиално на действие на всички е един и същи — индуциране на е. д. н. в роторните намотки от пулсиращия статорен магнитен поток.



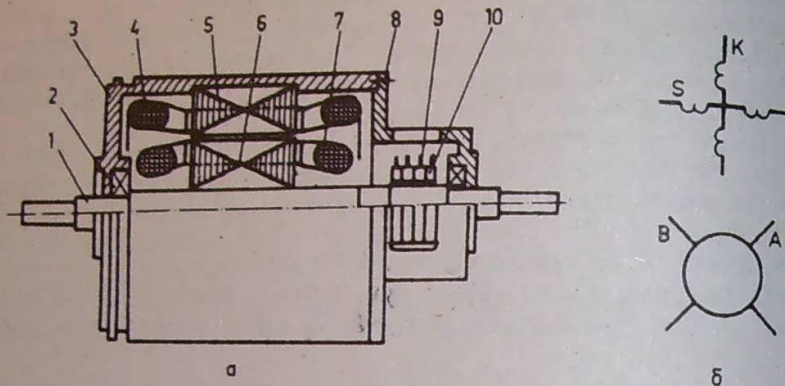
Фиг. 8.22. Блок-схема на завъртащ се трансформатор

При завъртането взаимната индуктивност между статорните и роторните намотки се изменя по синусов или косинусов закон. Така се изменя и изходното е. д. н.:

$$(8.15) \quad E = E_m \sin \theta$$

Завъртащият се трансформатор може да се разгледа като трансформатор с променлив коефициент на трансформация, който зависи от ъгъла на завъртане:

$$k = k_m \sin \theta = \frac{\omega_2 k_{w1}}{\omega_1 k_{w2}} \sin \theta.$$



Фиг. 8.23. Завъртащ се трансформатор

а — устройство: 1 — вал, 2 — лагер, 3 — тяло, 4 — статорна намотка, 5 — статорен пакет, 6 — роторен пакет, 7 — роторна намотка, 8 — лагерен щит, 9 — четки, 10 — контактни пръстени; б — условна схема

Тази зависимост е *синусоидна* с висока точност, достигаща до 0,1%. Затова се вземат специални конструктивни и технологични мерки, като висококачествена и точна изработка, добра изолация, магнитни материали с висока магнитна проникваемост, които са ненаситени, премахване на висшите хармоници, специални видове намотки и др. Завъртащите се трансформатори са едни от най-прецизните и скъпи микромашини.

8.3.2. Синус-косинусен завъртащ се трансформатор

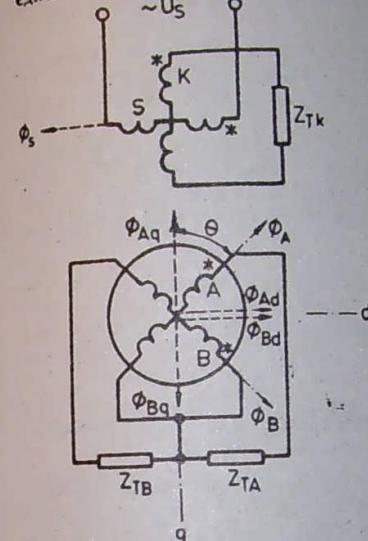
Схемата му е показана на фиг. 8.24. На една статорна намотка S, която е главна или *възбудителна*, се подава стабилизирано променливо захранващо напрежение $U_S = \text{const}$. Другата статорна намотка K се нарича *компенсационна* и към нея се включва товар Z_{TK} . Двете роторни намотки A и B са съответно *синусна* и *косинусна* намотка. Към тях се включват товарите Z_{TA} и Z_{TB} .

Когато на статорната намотка S се подаде възбудително напрежение U_S , в нея протича ток I_S , който създава пулсиращ магнитен поток Φ_S . Той индуцира в роторните намотки е. д. н. E_A и E_B .

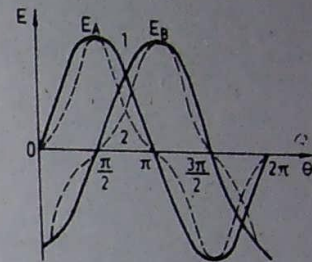
Моментните стойности на индуцираните е. д. н. в роторните намотки са:

$$(8.16) \quad \begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t \sin \theta; \\ e_B = E_m \sin \omega t \cos \theta. \end{cases}$$

Е. д. н. в двете намотки са *синфазни* във времето, защото се индуцират от един и същи статорен *пулсиращ* магнитен поток Φ_S . Ефективните им стой-



Фиг. 8.24. Схема на синус-косинусен завъртащ се трансформатор



Фиг. 8.25. Изходни характеристики на синус-косинусен завъртащ се трансформатор
1 — симетриран, 2 — несиметриран

ности зависят от пространствения ъгъл на завъртане θ по синусов, респ. косинусов, закон:

$$(8.17) \quad \begin{cases} E_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \sin \theta; \\ E_B = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \theta. \end{cases}$$

Когато завъртащият се трансформатор не е натоварен, E_A и E_B са синусоиди (фиг. 8.25 — кривите 1). Когато към вторичната страна се включват нееднакви товари, синусоидната зависимост се нарушава, защото магнитните потоци на роторните намотки Φ_A и Φ_B (т. е. реакцията на роторния ток) остават надлъжни съставки (d) по оста на S имат и напречни съставки (q) по оста на K. Последните остават некомпенсирани, защото в общия случай не са равни помежду си, като индуцират в роторните намотки допълнителни е. д. н. на самоиндукция. Те именно деформират изходните характеристики и нарушават синусоидния им характер (фиг. 8.25 — кривите 2).

Освен че необходимата синусоидна зависимост се нарушава, напречните потоци създават допълнителен електромагнитен момент на вала, който натоварва устройството, завъртащо трансформатора. В редни случаи това е недопустимо.

Може да се докаже, че входният импеданс на трансформатора е постоянен и не зависи от ъгъла на завъртане, което е предимство на вторичното симетриране.

Ако източникът е достатъчно мощен, $Z_{\text{пзт}} \rightarrow 0$ и следователно $Z_{\text{тк}} = 0$ — намотката K трябва да се свърже накъсо. При това не е необходимо за компенсация да се натоварват и двете роторни намотки, което е предимство на първичното симетриране.

8.4.1. Устройство на селсините

A technical cross-sectional drawing of a mechanical assembly, possibly a pump or valve. The drawing shows a central body with internal components. Numbered parts include: 1. A shaft or rod entering from the left. 2. A seal or gasket. 3. A housing or cover. 4. A top flange or cap. 5. A central shaft or rod. 6. A central valve or piston. 7. A top flange or cap. 8. A side housing or cover. 9. A small component, possibly a screw or pin. 10. A small component, possibly a screw or pin.

Фиг. 8.26. Еднофазен селсин

а — устройство; 1 — вал, 2 — лагерь, 3 — тяло, 4 — статорна намотка, 5 — статорен пакет, 6 — роторен пакет, 7 — роторна намотка, 8 — лагерен щит, 9 — четки, 10 — контактни пръстени; б — условна схема

По своето устройство (фиг. 8.26 а) селсините представляват маломощни асинхронни двигатели с фазен ротор, с четки и пръстени (като завъртащите се трансформатори).

Еднофазните селсини имат една първична възбудителна намотка в ста-

Пулсиращото магнитно поле, създадено от еднофазната възбудителна намотка, индукира в трифазната синхронизираща намотка е. д. н., които са свързани във времето. Големините им зависят синусоидно от пространственния ъгъл на въртане на ротора θ както при завъртаните се трансформират.

8.4.2. Режими на работа на селсините

жим на работа на селсините или индикаторната система е система за син-
фазно завъртане, т. е. за бавно превъртане на два механизма. Тази си-

Системата се употребява в автоматиката, авиацията, космонавтиката, флотата и др. за следене на положението на някои важни, но отдалечени работни органи на машините.

Индикаторната система (фиг. 8.27) се състои от т. нар. задаващо устройство ЗУ, чийто ъглов положение трябва да се следи и към което е съединен валът на единия селсен — датчикът Д. Към вала на другия селсен — приемника П, е прикачена лека балансирана стрелка (индикатор) И, която се върти пред скала, разграфена в ъглови градуси или някакви други деления.

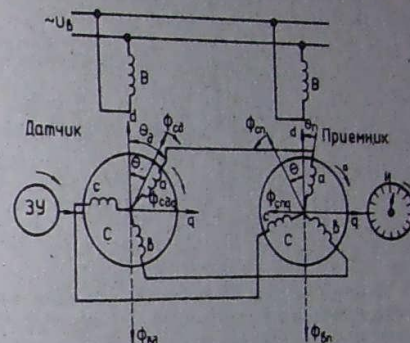
Двата селсина обикновено са еднакви. Датчикът преобразува ъгъла на завъртане в електрически сигнал и по синхронизиращата линия го предава на приемника, който го преобразува обратно в ъгъл.

Двата селсина може да се разглеждат като два трансформатора, работещи в паралел и свързани насрещно, коефициентът на трансформация на които е функция на ъгъла на завъртане на ротора.

тещи в паралел и свързани насрещно, коефициентът на трансформация е $k = 1$. В този случай електричното поле е функцията на ъгъла на завъртане на ротора.

Принцип на действие. Възбудителните намотки на двата селсина се захранват от едно и също еднофазно напрежение. Токовете, които протичат в тях, създават пулсиращи магнитни потоци, които пресичат синхронизиращите намотки и индукират в тях е. д. н. Ако двата селсина са в съгласувано положение, т. е. ако $\vartheta_d = \vartheta_l$, разсгласуването между тях е $\vartheta = \vartheta_d - \vartheta_l = 0$. Тогава е. д. н. между еднотактните фази на синхронизиращата линия и я намотките не протичат никакви токове. Следователно няма да се създава електромагнитен момент. Ако, докато роторът на приемника е неподвижен, задаващото устройство измести ротора на датчика на някакъв ъгъл, равновесието

183



Фиг. 8.27. Индикаторен режим

на схемата се нарушава и е. д. и E_d и E_q стават различни по големина. Под действието на възникналата разлика ΔE в синхронизиращите намотки протичат *изравнителни токове*. Те взаимодействуват с пулсиращите магнитни потоци на възбудителните намотки и се създават синхронизиращи електромагнитни моменти. Тези моменти се появяват на валовите и на двата селсиня, равни са по големина и са противно насочени. Моментът върху датчика се стреми да го върне в изходно положение, но роторът му е фиксиран от задаващото устройство и не може да се измести. Тогава целият синхронизиращ момент се поема от приемника, който се завърта в същата посока, в която е бил завъртан датчикът. Така приемникът се завърта до съгласуваното положение, при което ъгълите се изравняват, а роторните токове и моментите се анулират. По този начин приемникът „отработва“ ъгъла на датчика.

Ако се разменят две от фазите на синхронизиращата намотка, приемникът се завърта на същия ъгъл, но в обратна посока. Ако се разменят двата извода на някоя от възбудителните намотки, роторът се обръща на 180° , но посоката на въртене не се изменя.

Моментните стойности на индуктираните в синхронизиращите намотки е. д. н. са:

$$(8.18) \quad \begin{cases} e_{ad} = E_m \sin \omega t \cos \theta_d; \\ e_{bd} = E_m \sin \omega t \cos \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_{cd} = E_m \sin \omega t \cos \left(\theta_d - \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases}$$

Всички е. д. н. са *синфазни* във времето, защото се индуктират от един и същ *пулсиращ* магнитен поток. Само ефективните им стойности зависят синусовидно от пространствения ъгъл на завъртане θ :

$$(8.19) \quad \begin{cases} E_{ad} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \theta_d; \\ E_{bd} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \left(\theta_d - \frac{2\pi}{3} \right); \\ E_{cd} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \left(\theta_d - \frac{4\pi}{3} \right). \end{cases}$$

Сумата от токовете в синхронизиращите намотки е $I_a + I_b + I_c = 0$ за всякакъв ъгъл на разсъгласуване, защото липсва нулев проводник.

Като се има предвид, че ъгълът на разсъгласуване $\theta = \theta_d - \theta_n$, могат да се получат зависимостите на токовете във функция от него (фиг. 8.28). Вижда се, че всички токове се анулират едновременно само при $\theta = 0$ т. е. в съгласуваното положение, докато за всяка друга стойност на ъгъла те са различни от нула.

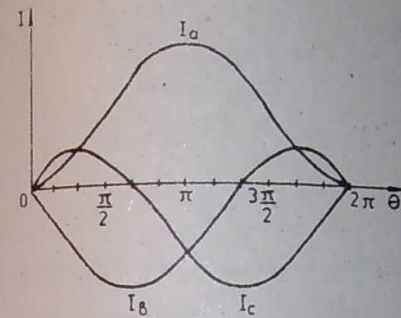
Синхронизиращите токове създават свои пулсиращи магнитни потоци (реакция на ротора), насочена по осите на фазите на синхронизиращите намотки, които могат да се разложат на надлъжни (d) съставки по оста на възбудителната намотка и напречни (q) съставки — перпендикулярно на нея.

Надлъжните реакции на двата селсиня са еднакви, съпосочни и насочени срещу възбудителните потоци. Напречните реакции на селсините са също равни, но са насочени в противни посоки. От взаимодействието на тези некомпенсирани напречни реакции на синхронизиращите намотки с маг-

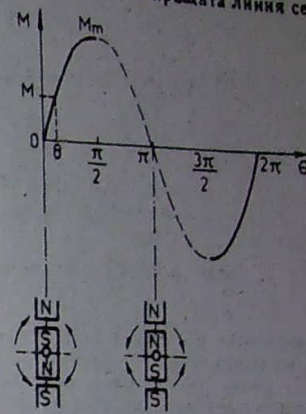
нитните потоци на възбудителните намотки възниква електромагнитен синхронизиращ момент:

$$M = M_d - M_n = M_m \sin \theta.$$

Зависимостта $M / f(\theta)$ е показана на фиг. 8.29 — синусоида. Моментът се анулира при $\theta = 0$ и при $\theta = \pi$, докато токовете в синхронизиращата линия се



Фиг. 8.28. Зависимости на синхронизиращите токове от ъгъла на разсъгласуване



Фиг. 8.29. Зависимост на синхронизиращия момент от ъгъла на разсъгласуване (статична ъглова характеристика)

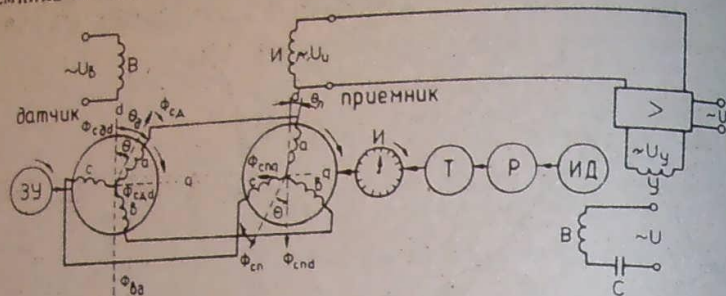
анулират само при $\theta = 0$. Поради това устойчивото положение е само едно — при $\theta = 0$, което е съгласуваното положение. От протичащите през намотката му синхронизиращи токове роторът се поляризира и може да се оприлича на постоянен магнит. От долната част на фактурата се вижда защо положението при $\theta = \pi$ е неустойчиво и защо съгласуваното положение е само едно — при $\theta = 0$.

Работата на селсините при $\theta = \frac{\pi}{2} \div \frac{3\pi}{2}$ в неустойчивата зона (след максимума) не е възможна. Ако роторът се разсъгласува с външна сила на такъв ъгъл и след това се освободи, той веднага се връща в устойчивото си положение.

2. **Трансформаторен режим.** Трансформаторният режим на работа на селсините или трансформаторната система се употребява там, където приемникът е натоварен със значителен полезен съпротивителен момент освен триенето. В този случай освен ъгъл дистанционно се предава и момент, но не и мощност, защото ъгловата скорост е много малка (бавно превъртане). Системата е също информационна, но освен индикаторния режим, където темата за предаване на момент се използва индикаторния режим, където приемникът сам обработва ъгъла, грешката $\Delta \theta$ е много голяма. Съгласно (8.23) тя би могла да се намали, ако максималният синхронизиращ момент M_m се увеличи, за което селсините трябва да станат много мощни и големи. Затова е по-рационално да се използва трансформаторният режим, където ъгълът не се отработва от приемника, а от изпълнителен двигател, като приемникът само го управлява.

Трансформаторната система (фиг. 8.30) се състои от *задаващо устройство* и *датчик Д* и *приемник П*, възбудителната намотка на който не е захранена.

пена, а е източник на напрежение. В такъв случай тя е изходна намотка (И). Напрежението от нея се подава през усилвател на управляващата намотка на един асинхронен изпълнителен двигател ИД с амплитудно-фазово управление. ИД е свързан през редуктора Р с товара Т, индикатора И и с ротора на приемника П. Това е затворена следяща система от най-прост тип, където



Фиг. 8.30. Трансформаторен режим

двигателят изпълнява ролята на отрицателна механична обратна връзка и в същото време е усилвател на момент.

Двата селсина могат да се разглеждат като два трансформатора, свързани последователно (каскадно), коефициентът на трансформация на които е функция на ъгъла на завъртане.

Принцип на действие. Възбудителната намотка на датчика създава пулсиращ магнитен поток, който индутира в синхронизиращата намотка е. д. н. В синхронизиращата намотка на приемника не се индутира е. д. н., което да се противопоставя на е. д. н. на датчика, и затова в синхронизиращата линия винаги текат токове. Тяхното магнитно поле индутира в изходната намотка е. д. н. както във вторичната намотка на трансформатор, затова приемникът се нарича селсин-трансформатор; оттук е и името на режима.

Когато селсините са в съгласувано положение, това е. д. н. е нула, двигателят е неподвижен и системата е в равновесие. Ако задаващото устройство измести датчика на някакъв ъгъл, в изходната намотка на приемника възниква е. д. н., което се усилва от усилвателя, подава се на управляващата намотка на изпълнителния двигател и той завърта ротора на приемника. Въртенето е в посока към намаляване на изходното напрежение, т. е. към намаляване на разсъгласуването — това е смисълът на отрицателната обратна връзка. Въртенето продължава дотогава, докато напрежението върху управляващата намотка на двигателя стане равно на нула и той спре. В този момент ъгълът на приемника трябва да бъде равен на ъгъла на датчика и системата да бъде в равновесие.

Токовете в линията и в синхронизиращите намотки не се определят от разликата между е. д. н. на датчика и приемника, а само от е. д. н. на датчика, защото е. д. н. на приемника е нула. Затова кривите на токовете са три синусоиди, разместени в пространството (недефазирани) на $\theta = 120^\circ$ — фиг. 8.31.

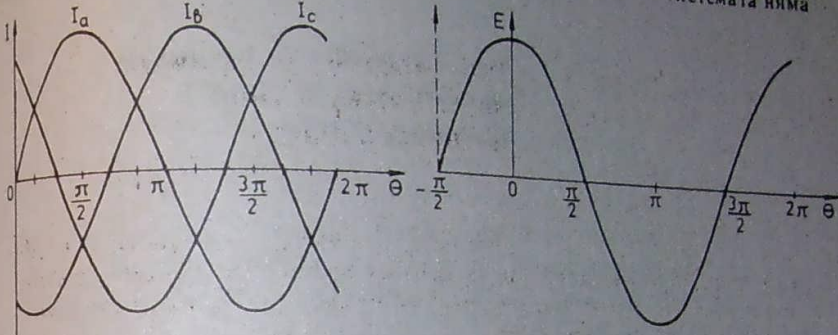
Създадените от тези токове магнитни потоци също се разлагат на надлъжни и напречни съставки, както в индикаторния режим.

Надлъжната съставка на реакцията на ротора, която има размагнитващо действие, се компенсира от страна на възбудителната намотка на датчика с протичане на увеличен ток от мрежата, а **напречната съставка**, като взаимодействува с резултантния поток, създава електромагнитен момент. Този момент се прилага върху датчика и се поема от задаващото устройство. Към работата на приемника той няма никакво отношение. Той е паразитен и нежелан.

Надлъжната съставка индутира в изходната намотка на приемника е. д. н. на трансформация, което не зависи от θ_d или θ_n , а само от θ :

$$(8.21) \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos \theta.$$

От (9.21) личи, че когато няма разсъгласуване ($\theta = 0$), изходното е. д. н. е максимално и двигателят се върти с най-голяма скорост. Системата няма



Фиг. 8.31. Зависимости на синхронизиращите токове от ъгъла на разсъгласуване

Фиг. 8.32. Зависимост на изходното е. д. н. от ъгъла на разсъгласуване

да бъде в равновесие. Затова естествената косинусовидна зависимост (8.21) е нецелесъобразна. Без да се изменя положението на ротора, трябва да се завърти статорът на приемника или стрелката му на 90° . Тогава ще се получат

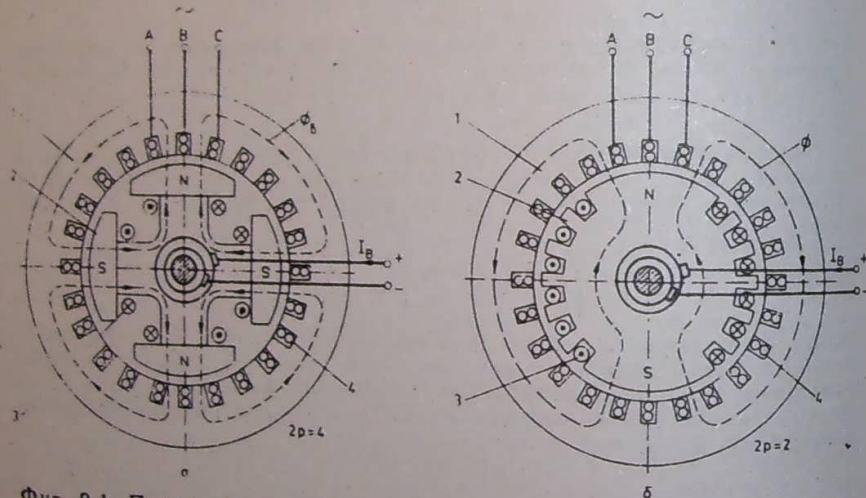
$$(8.22) \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{E_m}{\sqrt{2}} \sin \theta.$$

Това е търсената зависимост (фиг. 8.30), за която при $\theta = 0$ $E = 0$ и системата е в покой. Следователно съгласуваното положение при трансформаторен режим не е онова, при което осите на едноименните фази са успоредни както при индикаторен режим, а онова, при което са перпендикулярни. Двете положения се различават с 90° .

9 Синхронни машини

9.1. Устройство, принцип на действие и област на приложение

Устройство. Основните части на синхронната машина, както и на всяка въртяща се машина, са статорът и роторът. Принципно устройство на синхронната машина е показано на фиг. 9.1.



Фиг. 9.1. Принципно устройство на явнополусна (а) и неявнополусна (б) синхронна машина
1 — статор (котва); 2 — ротор (индуктор); 3 — възбудителна намотка; 4 — котвена намотка

Статорът на синхронната машина има същото устройство, както и статорът на асинхронната машина (вж. гл. VII). В каналите на статорния пакет е положена m -фазна (най-често 3-фазна) намотка, която има същия брой полюси, както и роторът. Според изпълнението на ротора синхронните машини са явнополусни и неявнополусни.

Явнополусните машини (фиг. 9.1а) имат явно-

изразени полюси в ротора, като броят им е $2p \geq 4$. Изработват се от листовка стомана с дебелина 1—2 mm, стягат се с шпилки и се закрепват към роторното тяло, което същевременно е роторен ярем, през който преминава магнитният поток на полюсите. Върху полюсите е поставена възбудителна намотка.

Неявнополусните машини (фиг. 9.1б) имат цилиндричен ротор, изработен от масивна стомана чрез изковаване. В ротора са фрезовани канали, в които се полага възбудителната намотка. Около $1/3$ от полюсното деление на ротора е свободно от канали и представлява т. нар. голям зъб (полюс). Изработват се с брой на полюсите $2p=2$ или $2p=4$.

При двете изпълнения възбудителната намотка служи за възбуждане на първичния магнитен поток на машината Φ . Тя се захранва чрез два контактни пръстена и четки с постоянен ток I_n от страничен източник. За източник най-често се използва генератор за постоянен ток или токоизправител, наречен възбудител, който има мощност 0,3—3% от мощността на синхронната машина.

Тъй като роторът е част от машината, която възбужда първичното магнитно поле, той се нарича още индуктор, а статорът е част, в която се индуцира е. д. н., и затова той се нарича още котва.

Принцип на действие на синхронния генератор. Нека роторът на машината да е възбуден и да се върти от първичен двигател с постоянна честота на въртене n , s^{-1} . Магнитният поток Φ пресича проводниците на статорната намотка и индуцира в нейните фази е. д. н., които образуват симетрична система и имат честота 9.1)

$$f_1 = pn,$$

където p е броят на двойките полюси.

При включване към статорната намотка на симетричен товар през фазните намотки преминават токове, които също образуват симетрична система. Статорните токове възбуждат въртящо се магнитно поле (вж. т. 6.4), което се върти в посоката на въртене на ротора с честота на въртене

$$(9.2) \quad n_1 = \frac{f_1}{p}.$$

След заместване на (9.1) в (9.2) се получава

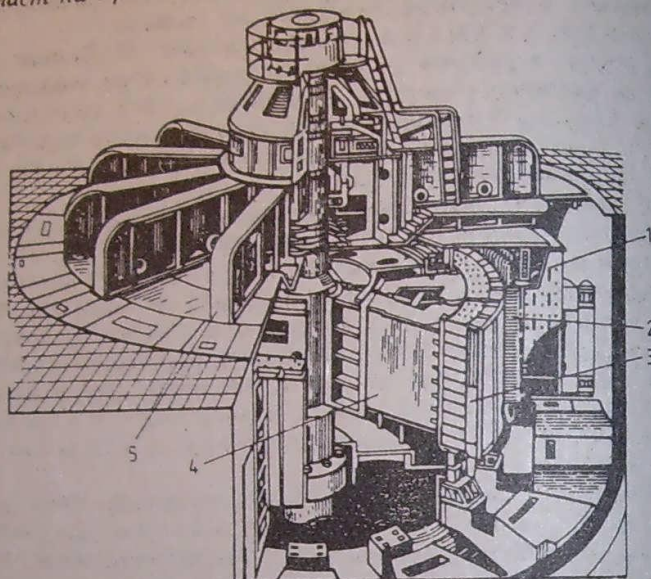
$$(9.3) \quad n = n_1,$$

т. е. роторът се върти в същата посока и със същата честота на въртене, както и въртящото се магнитно поле, възбудено от тока в статора. Това е основната характерна особеност на синхронните машини.

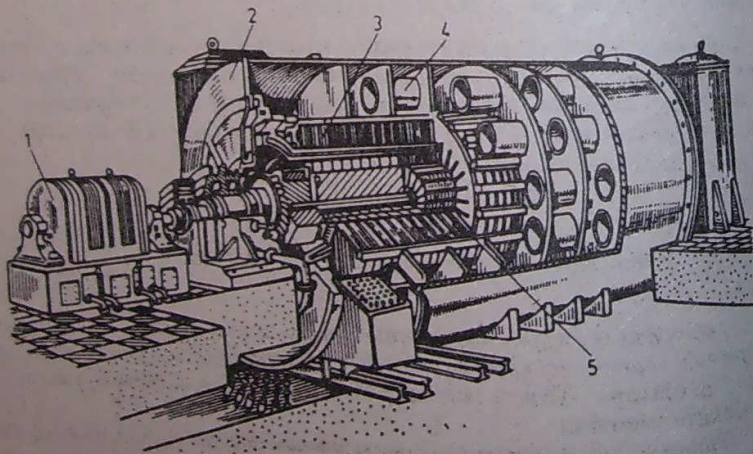
Принцип на действие на синхронния двигател. Както всички електрически машини, така и синхронната машина е обратима. Тя може да работи като двигател, ако статорната ѝ намотка се захранва с трифазно напрежение. От взаимодействието на магнит-

ните полета на статора и ротора се получава въртящ момент, под действие на който роторът ще се върти в същата посока и със същата честота на въртене, както и статорното поле.

Област на приложение. Синхронни машини се произвеждат за



Фиг. 9.2. Хидрогенератор
1 — корпус; 2 — статорен пакет; 3 — роторен полюс; 4 — роторно тяло;
5 — носеща кръстовина



Фиг. 9.3. Турбогенератор
1 — възбудител; 2 — корпус; 3 — статорен пакет; 4 — секция на водородното охлаждане; 5 — ротор

различни мощности (части от W до неколкостотин хиляди kW). За производство на променливотокова електрическа енергия с промишлена честота 50 Hz се използват трифазни синхронни генератори, които работят в термичните, водните и атомните електроцентрали. Явнополюсен синхронен генератор, който се задвижва от водна турбина, се нарича *хидрогенератор* (фиг. 9.2). Неявнополюсен синхронен генератор, който се задвижва от парна турбина, се нарича *турбогенератор* (фиг. 9.3).

В промишлени съоръжения, които работят при постоянна честота на въртене (вентилатори, компресори, помпи, нерегулируеми прокатни станове и др.), широко се използват синхронни двигатели с мощност от десетки до хиляди kW.

9.2. Реакция на котвата на синхронен генератор

Когато синхронният генератор работи на празен ход (към статорната му намотка не е включен товар), възбудителният ток I_b създава м. д. н. F_b , а то — магнитното поле на възбуждането с поток Φ_b . При въртене на ротора този поток индутира във всяка фаза на статорната намотка е. д. н., чиято ефективна стойност се означава с E_0 .

При натоварване на генератора със симетричен товар през статорните (котвените) фазни намотки преминава ток, чиято ефективна стойност се означава с I . Котвеният ток I създава м. д. н. на котвата F_a , а то — магнитното поле на котвата с поток Φ_a .

Докато при празен ход съществува само полето на възбуждането, при натоварване на генератора съществува още и полето на котвата.

Въздействието на полето на котвата върху полето на възбуждането се нарича *реакция на котвата*.

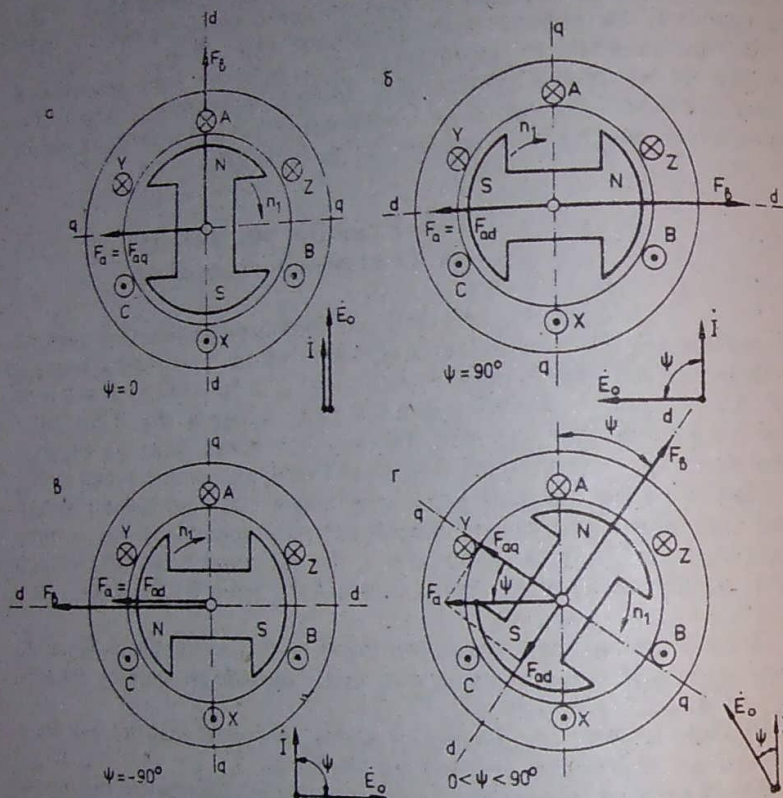
Влиянието на реакцията на котвата върху работните свойства на синхронната машина зависи както от големината на котвения ток, така и от характера на товара, т. е. от ъгъла на дефазирание φ между E_0 и I . За изясняване на това влияние се разглежда работата на синхронния генератор при различни стойности на ъгъл φ .

На фиг. 9.4 е показана елементарна синхронна машина при четири стойности на ъгъл φ . Роторът се върти с постоянна честота на въртене n_1 по посока на часовниковата стрелка. С N и S е означен поляритеът на полюсите. Оста на полюсите се нарича *надлъжна ос* и е означена с d , а оста, която е перпендикулярна на нея и минава през центъра на машината, се нарича *напречна ос* и е означена с q . Трифазната статорна (котвена) намотка е съсредоточена с диаметрална стъпка, като началата и краищата на фазните намотки са означени с $A-X$, $B-Y$, $C-Z$. При симетрич-

но натоварване токовете в трите фази образуват симетрична система, т. е.

(9.4)

$$\begin{cases} i_A = I_m \cos \omega t \\ i_B = I_m \cos (\omega t - 120^\circ) \\ i_C = I_m \cos (\omega t - 240^\circ) \end{cases}$$



Фиг. 9.4. Реакция на котвата на синхронен генератор

където I_m е максималната стойност на котвения ток, ω — кръговата честота, t — времето.

За всички случаи, показани на фиг. 9.5, е прието, че се разглежда моментът от време $t = 0$, в който токът във фаза A е максимален. След като в (9.4) се положи $t = 0$, за моментните стойности на токовете в трите фази се получава

(9.5)

$$i_A = I_m; \quad i_B = i_C = -0,5 I_m$$

На фиг. 9.4 са означени посоките на котвените токове в разглеждания момент от време. Прието е, че ако токът в дадена фаза е

положителен, той влиза в началото на тази фаза и посоката му се означава с $\otimes$, т. е. токът е насочен към чертежа, а ако е отрицателен, той излиза от началото на дадената фаза и посоката му се означава с $\odot$, т. е. токът е насочен от равнината на чертежа към наблюдателя.

Тъй като се разглежда моментът от време, в който токът във фаза A е максимален, м. д. н. F_a ще бъде насочено по оста на тази фаза, както е показано на фиг. 9.4 (вж. т. 6.4).

Следва последователно разглеждане на няколко случая при различни стойности на ъгъл ψ .

Ъгъл $\psi = 0$, т. е. I и E_0 са във фаза. Тъй като в разглеждания момент от време токът във фаза A е максимален, то и е. д. н. в същата фаза е максимално, поради което роторът трябва да заеме показаното на фиг. 9.4 а положение. Следователно при $\psi = 0$ м. д. н. на котвата F_a е насочено по напречната ос или, както е прието да се казва, реакцията на котвата е чисто напречна.

Ъгъл $\psi = 90^\circ$, т. е. I изостава от E_0 на 90° (фиг. 9.4 б). Токът във фаза A ще стане максимален след завъртане на ротора напред на 90° спрямо положението, което е заемал на фиг. 9.4 а. В случая м. д. н. на котвата F_a е насочено по надлъжната ос и е противоположно на F_n . Следователно при $\psi = 90^\circ$ реакцията на котвата е чисто надлъжна размагнитваща, в резултат на което потокът се намалява в сравнение със стойността му при празен ход.

Ъгъл $\psi = -90^\circ$, т. е. I изпреварва E_0 на 90° . Когато токът във фаза A е максимален, роторът трябва да заеме показаното на фиг. 9.4 в положение. В случая м. д. н. на котвата F_a е насочено по надлъжната ос и е съпосочно с F_n . Следователно при $\psi = -90^\circ$ реакцията на котвата е чисто надлъжна намагнитваща, в резултат на което потокът се увеличава в сравнение със стойността му при празен ход.

Ъгъл $\psi \in (0^\circ, 90^\circ)$, т. е. I изостава от E_0 на някакъв ъгъл между 0 и 90° . Когато токът във фаза A е максимален, роторът трябва да заеме показаното на фиг. 9.4 г положение. М. д. н. на котвата може да се разложи на напречна (F_{aq}) и надлъжна (F_{ad}) съставка:

(9.6)

$$\begin{cases} F_{aq} = F_a \cos \psi \\ F_{ad} = F_a \sin \psi \end{cases}$$

при което надлъжната съставка действа размагнитващо.

Ъгъл $\psi \in (-90^\circ, 0^\circ)$, т. е. I изпреварва E_0 на някакъв ъгъл между -90° и 0° . По аналогичен на изложения в предишния случай начин може да се покаже, че м. д. н. F_a има както напречна, така и надлъжна съставка, като последната действа намагнитващо.

Както м. д. н. F_a , така и котвеният ток I може да бъде разложен на напречна (I_q) и надлъжна (I_d) съставка:

$$\begin{cases} I_q = I \cos \psi; \\ I_d = I \sin \psi. \end{cases} \quad (9.7)$$

Разглеждания бяха направени за момента от време, когато токът във фаза A е максимален. Направените изводи важат за произволен момент от времето, тъй като F_a и F_d се въртят с ω х р о н о.

9.3. Уравнения и векторни диаграми на синхронния генератор

Векторната диаграма на синхронния генератор представлява геометричен образ на уравнението за равновесие на напреженията в котвената намотка.

Приемаме, че е допустимо използването на принципа на наслагването, при което може всяко м. д. н. да възбужда свой поток, който индутира съответно е. д. н. в котвената намотка.

Явнополюсна машина. В котвената намотка на явнополюсния синхронен генератор действуват следните напрежения:

$\dot{E}_0 = -j\sqrt{2}\pi f \omega k_a \Phi_a$, което се индутира от потока на възбуждането Φ_a , създаден от м. д. н. F_a ;

$\dot{E}_{ad} = -jI_d x_{ad}$, което се индутира от потока на надлъжната реакция на котвата Φ_{ad} , възбуден от м. д. н. F_{ad} ;

$\dot{E}_{aq} = -jI_q x_{aq}$, което се индутира от потока на напречната реакция на котвата Φ_{aq} , възбуден от м. д. н. F_{aq} ;

$\dot{E}_{sa} = -jI x_{sa}$, което се индутира от потока на разсейване Φ_{sa} , възбуден от котвения ток I и свързан само с котвената намотка;

$U_r = I r_a$ — пад на напрежение в активното съпротивление на котвената намотка r_a ;

U — напрежение на изходите на котвената намотка.

Тук x_{ad} и x_{aq} са индуктивните съпротивления на реакцията на котвата съответно по надлъжната и напречната ос, а x_{sa} е индуктивното съпротивление на разсейване на котвената намотка.

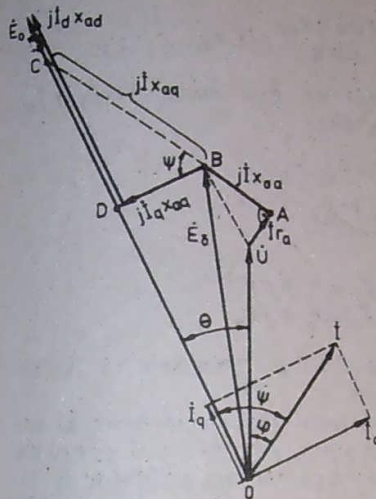
Съгласно с втория закон на Кирхоф $\sum \dot{U} = \sum \dot{E}$ може да се запише

$$\begin{aligned} \dot{U} + I r_a &= \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{sa} = \\ &= \dot{E}_0 - jI_d x_{ad} - jI_q x_{aq} - jI x_{sa}, \end{aligned} \quad (9.8)$$

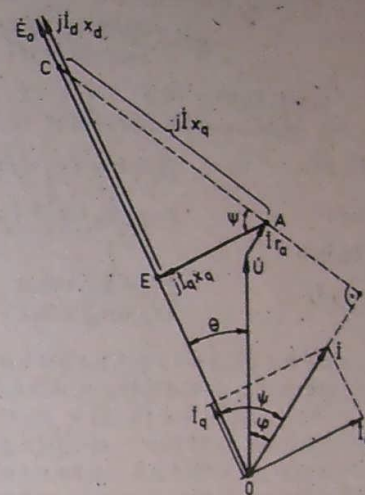
откъдето

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + I r_a + jI_d x_{ad} + jI_q x_{aq} + jI x_{sa}. \quad (9.9)$$

Въз основа на (9.9) е построена векторната диаграма на явнополюсен синхронен генератор, показана на фиг. 9.5, наречена



Фиг. 9.5. Първи вид на векторната диаграма на явнополюсен синхронен генератор



Фиг. 9.6. Втори вид на векторната диаграма на явнополюсен синхронен генератор

векторна диаграма от първи вид. При известни U , I , φ и всичките параметри първо се построяват U и I , като ъгълът между тях е φ . Към U се прибавят $I r_a$ успоредно на I , $jI x_{sa}$ перпендикулярно на I и по този начин се получава резултатното е. д. н.

$$\dot{E}_d = \dot{U} + I r_a + jI x_{sa} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}, \quad (9.10)$$

което се индутира от реално съществуващия в машината магнитен поток Φ_d , възбуден от резултатното м. д. н. F_d .

Върху продължението AB се нанася отсечка

$$BC = jI x_{aq}. \quad (9.11)$$

Правата OC определя направлението на е. д. н. $\dot{E}_0$ и затова ъгълът между нея и тока I е ψ . Разлага се котвеният ток на двете му съставки: $I_q = I \cos \psi$ и $I_d = I \sin \psi$.

Към $\dot{E}_s$ се прибавят $jI_q x_{aq}$ перпендикулярно на I_q и $jI_d x_{ad}$ перпендикулярно на I_d , в резултат на което се получава $\dot{E}_o$. Ъгълът θ между $\dot{E}_o$ и $\dot{U}$ се нарича ъгъл на натоварването. Правомерността на (9.11) се доказва по следния начин. От $\triangle DBC$ следва, че

$$BC = \frac{DB}{\cos \phi} = \frac{I_q x_{aq}}{\cos \phi} = \frac{I \cos \phi x_{aq}}{\cos \phi} = I x_{aq}.$$

След като в (9.9) токът се представи във вида $I = I_q + I_d$ след известно преобразуване се получава

$$(9.12) \quad \dot{E}_o = \dot{U} + I r_a + j I_q x_{aq} + j I_d x_{ad}$$

или

където

$$(9.13) \quad \begin{cases} x_q = x_{aq} + x_{oa}; & Z_q = r_a + j x_q; \\ x_d = x_{ad} + x_{oa}; & Z_d = r_a + j x_d \end{cases}$$

са синхронните индуктивни съпротивления и им подадени по напречната и надлъжната ос.

Въз основа на (9.12) е построена векторната диаграма на неявнополюсен синхронен генератор, показана на фиг. 9.6, която ще наречем векторна диаграма от втори вид. Нейното построение се извършва в следната последователност. Построяват се $\dot{U}$ и I , като ъгълът между тях е ϕ . Към $\dot{U}$ се прибавя $I r_a$. През т. А се прекарва права, перпендикулярна на I , и върху тази права се нанася отсечка

$$(9.14) \quad AC = j I x_q.$$

Правата, преминаваща през т. О и С, определя направлението на $\dot{E}_o$ и следователно тя сключва с I ъгъл ψ . Разлага се котвеният ток на двете му съставки I_q и I_d . Към $I r_a$ се прибавят $j I_q x_{aq}$ перпендикулярно на I_q и $j I_d x_{ad}$ перпендикулярно на I_d , в резултат на което се получава $\dot{E}_s$, сключващо с $\dot{U}$ ъгъл θ . Верността на (9.14) се доказва по следния начин. От $\triangle EAC$ следва

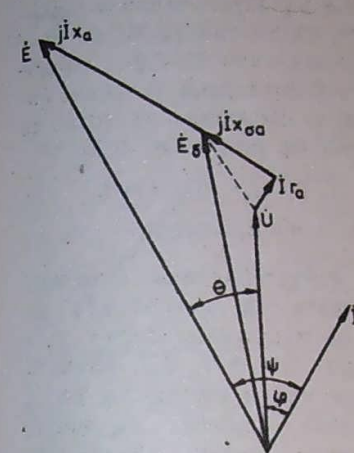
$$AC = \frac{EA}{\cos \phi} = \frac{I_q x_{aq}}{\cos \phi} = \frac{I \cos \phi x_{aq}}{\cos \phi} = I x_{aq}.$$

Неявнополюсна машина. При неявнополюсните машини магнитните съпротивления във всички радиални направления са еднакви, поради което в (9.9) се полага $x_{ad} = x_{aq} = x_a$, и като се вземе предвид, че $I_q + I_d = I$, се получава

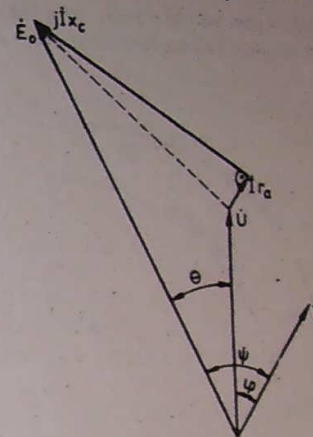
$$(9.15) \quad \dot{E}_o = \dot{U} + I r_a + j I x_{oa} + j I x_a = \dot{E}_s + j I x_a,$$

където x_a е индуктивното съпротивление на реакцията на котвата.

Първият вид на векторната диаграма на неявнополюсен синхронен генератор, построена въз основа на (9.15), е показан на фиг. 9.7. Построяват се $\dot{U}$ и I , сключващи ъгъл ϕ . Към $\dot{U}$ се



Фиг. 9.7. Първи вид на векторната диаграма на неявнополюсен синхронен генератор



Фиг. 9.8. Втори вид на векторната диаграма на неявнополюсен синхронен генератор

прибавят $I r_a$, $j I x_{oa}$ и се получава $\dot{E}_s$. Към $\dot{E}_s$ се прибавя $j I x_a$ и се получава $\dot{E}_o$.

Уравнение (9.15) може да се представи във вида

$$(9.16) \quad \dot{E}_o = \dot{U} + I r_a + j I x_c,$$

респ.

$$\dot{E}_o = \dot{U} + I Z_c,$$

където

$$(9.17) \quad x_c = x_a + x_{oa} \text{ и } Z_c = r_a + j x_c$$

са синхронните индуктивни съпротивления.

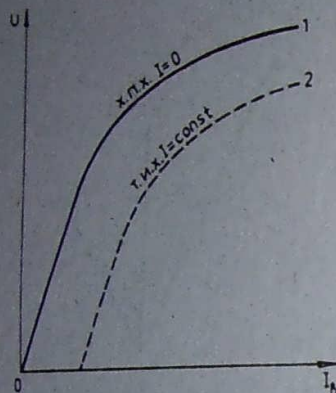
Вторият вид на векторната диаграма на неявнополюсен синхронен генератор, построена въз основа на (9.16), е показан на фиг. 9.8. Построяват се $\dot{U}$ и I , сключващи ъгъл ϕ . Към $\dot{U}$ се прибавят $I r_a$ успоредно на I и $j I x_c$ перпендикулярно на I , в резултат на което се получава $\dot{E}_o$.

9.4. Характеристики на синхронния генератор

Работните свойства на синхронния генератор се определят от неговите характеристики.

Характеристика на празен ход (х.п.х.) Представлява зависимостта на напрежението на изводите на машината U от възбудителния ток I_a при котвен ток $I=0$ (отворена котвена намотка) и постоянна честота на въртене на ротора n , т.е.

$$U = f(I_a) \text{ при } I=0; \\ n = n_n = \text{const.}$$



Фиг. 9.9. Характеристика на празен ход (1) и товарна индуктивна характеристика (2) на синхронен генератор

Тази характеристика определя свойствата на магнитната верига на машината. Вилът ѝ е показан на фиг. 9.9, крива 1.

При малки стойности на I_a магнитната система на машината не е наситена, поради което връзката между U и I_a е линейна. Линейният участък е толкова по-голям, колкото е по-голяма въздушната междина на машината. При увеличаване на

I_a се увеличава насищането и затова х.п.х. се закривява.

Характеристика на късо съединение (х.к.с.) Представлява зависимостта на котвения ток I от възбудителния ток I_a при $U=0$ (затворени на късо изводи на котвената намотка) и постоянна честота на въртене на ротора n , т.е.

$$I = f(I_a) \text{ при } U=0; n = n_n = \text{const.}$$

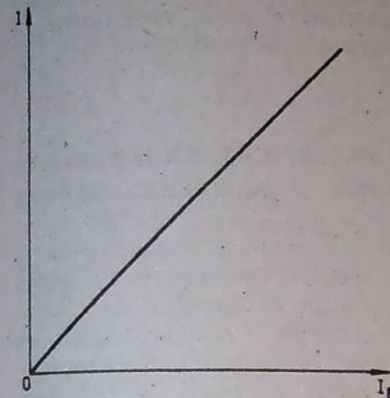
Ако се пренебрегне незначителното активно съпротивление на котвената намотка ($r_a=0$), съпротивлението във веригата на котвената намотка ще бъде чисто индуктивно. Затова $\psi=90^\circ$ (реакцията на котвата е чисто надлъжна размагнитваща), $I_q=0$, $I_d=I$ и (9.9) добива вида

$$E_o = jI x_{oa} + jI x_{ad} = E_s + jI x_{ad},$$

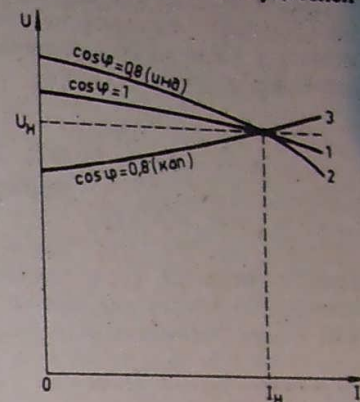
като резултатното е.д.н. се определя от израза $E_s = I x_{oa}$. Тъй като x_{oa} има твърде малка стойност, малко ще бъде E_s , а следователно малък ще бъде и резултатният магнитен поток Φ_s .

Поради това при късо съединение магнитната система на машината не е наситена и х.к.с. е праволинейна (фиг. 9.10).

Външна характеристика. Представлява зависимостта на напрежението U от котвения ток I при постоянни възбудителен



Фиг. 9.10. Характеристика на късо съединение на синхронен генератор



Фиг. 9.11. Външни характеристики на синхронен генератор

ток I_a , коефициент на мощността $\cos \varphi$ и честота на въртене на ротора n :

$$U = f(I) \text{ при } I_a = \text{const}; \cos \varphi = \text{const}; n = n_n = \text{const.}$$

На фиг. 9.11 са показани външни характеристики при различен характер ($\cos \varphi$) на товара на генератора. Прието е, че за всеки от случаите възбудителният ток е регулиран така, че при номинален ток ($I=I_n$) напрежението също е равно на номиналното ($U=U_n$). Най-голям е I_a за характеристика 2 и най-малък — за характеристика 3.

При чисто активен товар (крива 1 на фиг. 9.11) с увеличаване на тока I напрежението U се намалява главно поради размагнитващото действие на надлъжната реакция на котвата. При активно-индуктивен товар (крива 2 на фиг. 9.11) с увеличаване на I напрежението се намалява, и то по-силно отколкото в предишния случай, поради това че в случая ъгълът ψ между E_o и I е по-голям и следователно размагнитващото действие на надлъжната реакция на котвата е по-голямо. При активно-капацитивен товар (крива 3 на фиг. 9.11) с увеличаване на I напрежението U се увеличава, тъй като в случая надлъжната реакция на котвата действува намагнитващо.

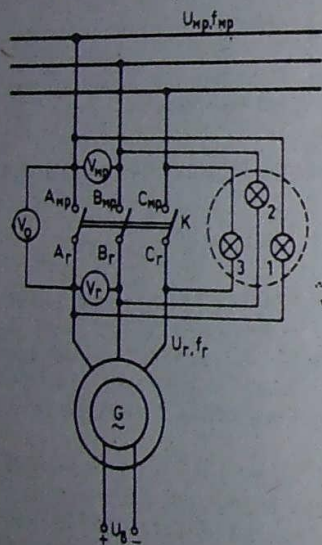
Товарна характеристика. Представлява зависимостта на напрежението U от възбудителния ток I_a при постоянни котвен ток I , коефициент на мощността $\cos \varphi$ и честота на въртене на ротора

л. Практически интерес представлява т. нар. товарна индуктивна характеристика (т. и. х.), при която $\cos \varphi = 0$ (инд.), т. е. токът изостава на 90° от напрежението: $U = f(I_n)$ при $I = \text{const} \neq 0$; $\cos \varphi = 0$ (инд.); $n = n_n = \text{const}$.

Видът на т. и. х. е показан на фиг. 9.9, крива 2. Ако се приеме $r_a = 0$, при условията на снемането на т. и. х. реакцията на котвата е чисто надлъжна размагнитваща, поради което т. и. х. лежи под х. п. х.

9.5. Включване на синхронните генератори в паралелна работа

Най-често синхронните генератори в електроцентралите се включват да работят паралелно на обща електроразпределителна мрежа. При това се постига: 1) сигурност в електроснабдяването на консуматорите; при необходимост (авария, ремонт) отделни генератори могат да бъдат изключени, но останалите генератори ще осигуряват захранването на консуматорите; 2) икономичност в работата на синхронните генератори. При изменение на общия товар чрез включване или изключване на отделни машини може да се постигне работа на генераторите с номинална мощност и следователно с най-добър к. п. д.

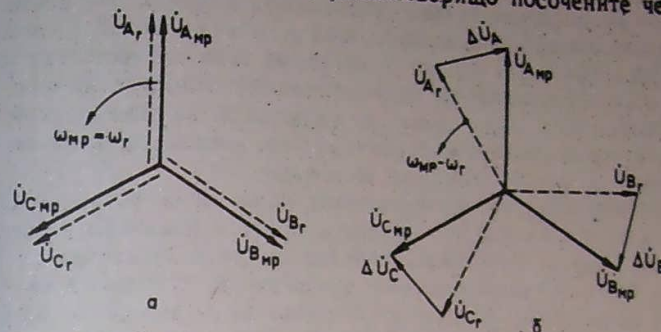


Фиг. 9.12. Включване на синхронен генератор в паралелна работа

За да се включи един синхронен генератор (фиг. 9.12) паралелно към мрежа, в която работят други синхронни генератори, трябва да бъдат изпълнени следните условия:

1. Напрежението на включвания генератор U_g да бъде равно на напрежението на мрежата U_m .
 2. Честотата на генератора f_g да бъде равна на честотата на мрежата f_m .
 3. Фазовите редове на генератора и на мрежата да бъдат еднакви.
 4. Напреженията U_g и U_m да са във фаза.
- Процесът на изпълнение на тези условия се нарича синхронизация на синхронния генератор. В практиката се

използват два метода: 1) метод на точната синхронизация; 2) метод на самосинхронизацията (на грубата синхронизация). Метод на точната синхронизация. Същността на метода се състои в това, че преди да се включи генераторът към мрежата, той се привежда в състояние, удовлетворящо посочените четири



Фиг. 9.13. Векторни диаграми на напреженията на мрежата (U_m) и на генератора (U_g)

условия. Когато всички условия са изпълнени, векторите на напреженията на генератора и на мрежата съвпадат и се въртят с еднаква ъглова скорост, числено равна на кръговата честота на мрежата ω_m и на генератора ω_g (фиг. 9.13 а).

Еднаквостта на напреженията се контролира с волтметри и се постига чрез регулиране на възбудителния ток на генератора. Еднаквостта на честотите се контролира с честотомери и се постига чрез регулиране на честотата на въртене на генератора. Еднаквостта на фазовия ред се проверява с указател на фазовия ред, за който най-често се използва малък индукционен двигател. В случай че фазовият ред не е еднакъв, трябва да се разменят местата на две от фазите на генератора.

Изпълнението на последното условие (съвпадане по фаза на напреженията на генератора и на мрежата) не може да се постигне за продължително време. Затова практически се постъпва по следния начин. Честотата на генератора се доближава максимално до честотата на мрежата. Тъй като, макар и малко, двете честоти се различават, звездата на напреженията на генератора се върти спрямо звездата на напреженията на мрежата с релативната ъглова скорост $\omega_m - \omega_g$ (фиг. 9.13 б). Ясно е, че периодично ще настъпват моменти, когато двете звезди съвпадат и риодично ще настъпват моменти, когато двете звезди съвпадат и един от тези моменти се използва за включване на генератора. Моментът, в който трябва да се извърши включването, се установява със синхроноскоп. Синхроноскопите са лампови и стрелкови.

На фиг. 9.12 е показан лампов синхроноскоп, който се състои от три лампи 1, 2, 3, разположени във върховете на

равностранен триъгълник. Тъй като лампите са включени между едноименни фази, те са подложени на напрежение ΔU (фиг. 9.13 б), което периодично ще се изменя между нула и двойното фазово напрежение. Това означава, че силата на светене на лампите периодично ще се изменя от напълно загасване до максимална яркост. Генераторът трябва да се включи в момент от време, когато двете звезди съвпадат (фиг. 9.13 а), т. е. когато и трите лампи загаснат. Стремешът е f_r да се регулира така, че честотата на загасванията на лампите да бъде минимална. Лампите на фиг. 9.12 са свързани по т. нар. схема за включване на *тъмно*, тъй като моментът за включване настъпва тогава, когато лампите не светят. Има и други схеми за включване.

Поточно моментът на включване може да се установи с нулев волтметър V_0 , включен, както е показано на фиг. 9.12. При $f_r = f_{mr}$ 0 неговата стрелка ще се колебае между нула и едно максимално отклонение, което съответствува на двойното фазово напрежение. Генераторът трябва да се включи в момента, когато стрелката на волтметъра преминава през нулата.

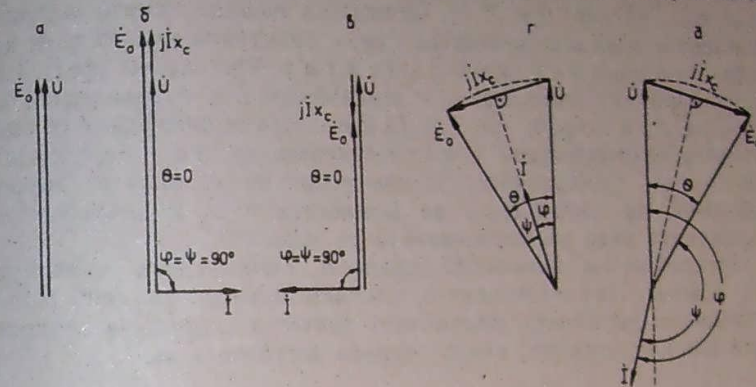
Стрелковият синхроскоп е електромагнитен уред, който работи на принципа на въртящото се магнитно поле. При $f_r = f_{mr} \neq 0$ неговата стрелка се върти с честота $f_r - f_{mr}$ в една или друга посока в зависимост от това, коя от честотите е по-голяма. Генераторът трябва да се включи, когато стрелката на синхроскопа е насочена вертикално нагоре.

Използват се и автоматични синхронизатори, които автоматично регулират U_r и f_r и при изпълнение на необходимите условия включват генератора към мрежата. По този начин се изключват възможни грешки на персонала и се облекчава неговата работа.

Метод на самосинхронизацията. Същността на метода е следната. Възбудителната намотка се затваря през резистор, за да се избегне възникването на пренапрежения в нея при включването на генератора към мрежата. Роторът на невъзбудения генератор се развърта до синхронната честота на въртене, след което котвената му намотка се включва към мрежата. Веднага след включването на генератора към възбудителната му намотка се подава възбудителното напрежение и генераторът сам влиза в синхронизъм. Тъй като в момента на включването на генератора напрежението му е равно на нула, неизбежно за кратко време се получават токов удар и повишени механични усилия на вала на машината. Обаче както показва опитът, те не са опасни за машината. Използването на метода на самосинхронизацията е целесъобразно при чести включвания, тъй като изисква малко време и лесно се автоматизира.

9.6. Паралелна работа на синхронната машина

Режимът на работа на паралелно включената към мрежата синхронна машина при синхронна честота на въртене се нарича *синхронен режим*. Приема се, че машината е включена към мрежа с *безкрайно голяма мощност*, за която $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$. Практически това означава, че мощ-



Фиг. 9.14. Синхронни режими на синхронната машина: а — ненатоварена машина; б — превъзбуден синхронен компенсатор; в — недовъзбуден синхронен компенсатор; г — синхронен генератор; д — синхронен двигател

ността на всички включени към мрежата синхронни генератори е много по-голяма от мощността на разглежданата машина, поради което тя не влияе на напрежението и честотата на мрежата. За простота се разглежда неявнополусна синхронна машина, като се приема, че $r_a = 0$. Тогава (9.16) ще има вида

$$(9.18) \quad \vec{E}_0 = U + jI x_c.$$

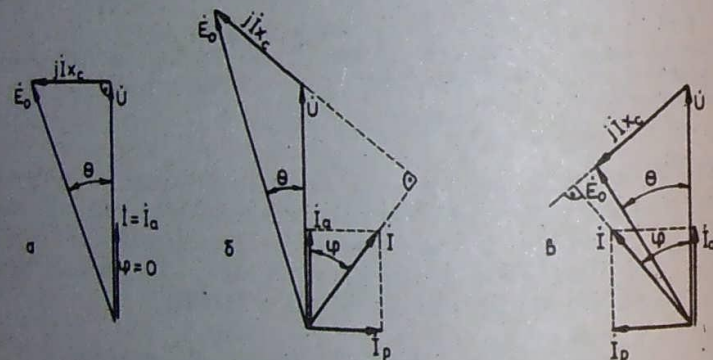
Изменение на реактивната мощност. Режим на синхронен компенсатор. След включване на синхронната машина към мрежата (при изпълнени условия, дадени в т. 9.5), тъй като $U_r = U_{mr}$ или $\vec{E}_0 = U$, от (9.18) следва, че $I = 0$ (фиг. 9.14 а). Това състояние се приема за изходно.

Нека увеличим възбудителния ток спрямо стойността му в изходното състояние. Тогава $E_0 > U$ и съгласно с (9.18) векторната диаграма има показания на фиг. 9.14 б вид. Проекцията на U върху I ($I \cos \varphi$) е равна на нула и затова активната мощност на машината $P = mUI \cos \varphi$ също ще бъде равна на нула. Машината отдава в мрежата чисто индуктивен ток и реактивна индуктивна мощност.

Ако намалим стойността на възбудителния ток спрямо стойността му в изходното състояние, то $E_0 < U$ и векторната диаграма има показания на фиг. 9.14 в вид. Отново активната мощност $P = 0$, като машината отдава в мрежата чисто капацитивен ток и реактивна капацитивна мощност, т. е. консумира от мрежата реактивна индуктивна мощност.

Следователно при изменение на възбудителния ток на синхронната машина се изменят само реактивният ток и реактивната мощност. За случаите, които съответствуват на фиг. 9.14 б, в, $\varphi = \pm 90^\circ$; $\theta = 0$ и $P = 0$. Синхронна машина, чиято активна мощност е нула и е натоварена само с реактивна мощност, се нарича синхронен компенсатор. При $E_0 > U$ (фиг. 9.14 б) синхронният компенсатор е превъзбуден и е еквивалентен на кондензатор, а при $E_0 < U$ (фиг. 9.14 в) синхронният компенсатор е недовъзбуден и е еквивалентен на индуктивна бобина. Синхронните компенсатори се използват за подобряване на коефициента на мощността и за поддържане на нормалното ниво на напрежението на мрежата.

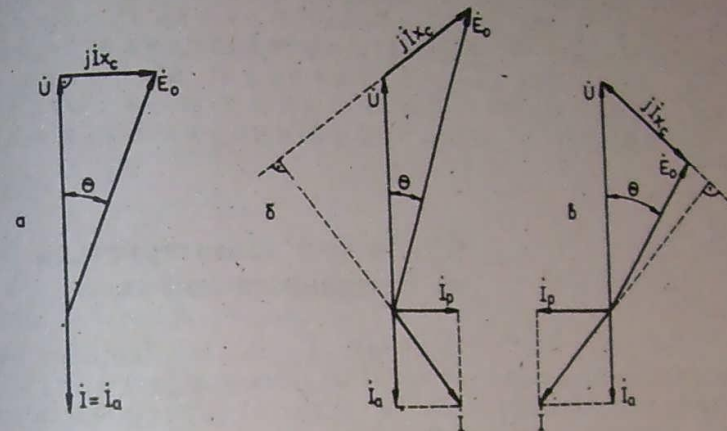
Изменение на активната мощност. Генераторен и двигателен режим. При състоянието, съответстващо на фиг. 9.14 а (изходното състояние), първичният двигател подава на синхронната машина мощност, която покрива загубите в нея.



Фиг. 9.15. Векторни диаграми на синхронен генератор при $P = \text{const}$ и различно възбуждане
а — нормално възбуден генератор; б — превъзбуден генератор; в — недовъзбуден генератор

Нека мощността на първичния двигател се увеличи спрямо стойността ѝ в изходното състояние. Тогава роторът се ускорява и съответно E_0 (запазвайки големината си, тъй като възбудителният ток не е изменен) ще изпревари U на някакъв ъгъл θ (фиг. 9.14 г). Възниква ток I , който съгласно с (9.18) изостава от $jI x_c$ на 90° . Проекцията на I върху U е положителна, съответно $P = mUI \cos \varphi > 0$, което означава, че машината отдава в мре-

жата активна мощност, т. е. тя работи като генератор. Установява се такъв ъгъл θ (ъгълът между E_0 и U , съответствуващ на ъгъла между оста на полюсите и оста на резултатното магнитно поле), при който получаваната от първичния двигател механична мощност отговаря на отдаваната в мрежата активна мощност P . При увеличаване или намаляване на P се установява по-голям или по-малък ъгъл θ , при което гене-



Фиг. 9.16. Векторни диаграми на синхронен двигател при $P = \text{const}$ и различно възбуждане
а — нормално възбуден двигател; б — превъзбуден двигател; в — недовъзбуден двигател

раторът отдава по-голяма или по-малка активна мощност, по роторът се върти със синхронната честота на въртене. Става ясно защо ъгъл θ се нарича ъгъл на натоварването.

Ако механичната мощност стане отрицателна, т. е. ако се натовари механично валът на машината, роторът ще се забави и E_0 ще изостане от U на някакъв ъгъл θ (фиг. 9.14 д). Съгласно (9.18) I изостава от $jI x_c$ и ще заеме показаното положение. Сега проекцията на I върху U е отрицателна, съответно $P = mUI \cos \varphi < 0$, т. е. отдаваната в мрежата активна мощност е отрицателна, което означава, че машината не отдава, а консумира активна мощност от мрежата и работи като двигател. Ъгъл θ има стойност, при която получаваната от мрежата активна мощност отговаря на отдаваната на вала на двигателя механична мощност. При увеличаване или намаляване на механичния товар на вала на двигателя съответно по-голям или по-малък ще бъде ъгъл θ .

При генератор E_0 изпреварва U , съответно оста на полюсите изпреварва оста на резултатното магнитно поле и ъгъл θ се

смята за положителен. При двигател е обратно и затова ъгъл θ се приема за отрицателен.

Както се вижда от фиг. 9.14 а, д, токът I освен активна има и определена реактивна съставка.

Ако се измени възбудителният ток при $P = \text{const}$, при запазване на активната мощност P ще се изменят реактивният ток и реактивната мощност. При определен възбудителен ток (нормално възбудена машина) както генераторът, така и двигателят работят с $\cos \varphi = 1$ (фиг. 9.15 а и 9.16 а). Превъзбуденият генератор или двигател (фиг. 9.15 б и 9.16 б) отдава в мрежата реактивна индуктивна мощност, а недовъзбуденият (фиг. 9.15 в и 9.16 в) — консумира от мрежата реактивна индуктивна мощност.

9.7. Ъглови характеристики на синхронната машина

Означаваме с P_δ електромагнитната мощност на синхронната машина. При генератор това е мощността, която чрез магнитното поле се предава от ротора към статора, а при двигател — мощността, която чрез магнитното поле се предава от статора към ротора.

При генератор е в сила зависимостта $P_\delta = P + p_c + p_{ел}$, а при двигател $P_\delta = P - p_c - p_{ел}$, където

$P = mUI \cos \varphi$ при генератор е активната мощност, която машината отдава в мрежата, а при двигател — активната мощност, която машината консумира от мрежата;

p_c са загубите в стоманата на статорния пакет;

$p_{ел} = mI^2 r_a$ — електрическите загуби в котвената намотка.

При допускане, че $p_c = 0$ и $p_{ел} = 0$ ($r_a = 0$), както за генератор, така и за двигател

$$(9.19) \quad P_\delta = P = mUI \cos \varphi.$$

Електромагнитният момент е

$$(9.20) \quad M = \frac{P_\delta}{\Omega_1} = \frac{P}{2\pi n_1},$$

където

Ω_1 е синхронната ъглова скорост;

n_1 — синхронната честота на въртене.

Зависимостите $P = f(\theta)$ и $M = f(\theta)$ при $E_o = \text{const}$ и $U = \text{const}$ се наричат ъглови характеристики на синхронната машина.

Извеждане на аналитичен израз за ъгловата характеристика. При $r_a = 0$ уравн. (9.12) ще има вида

$$(9.21) \quad \vec{E}_o = \vec{U} + jI_q x_q + jI_d x_d.$$

В съответствие с (9.21) е построена векторната диаграма на фиг. 9.17. Пресектират се напрежения върху направлението на E_o и върху перпендикулярно на него направление, при което

$$E_o = U \cos \theta + I_d x_d; \quad U \sin \theta = I_q x_q,$$

откъдето

$$(9.22) \quad \begin{cases} I_d = \frac{E_o - U \cos \theta}{x_d}; \\ I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}. \end{cases}$$

От фиг. 9.17 следва, че $\varphi = \psi - \theta$.
Тогава от (9.19) се получава

$$(9.23) \quad \begin{aligned} P &= mUI \cos \varphi = mUI \cos (\psi - \theta) = \\ &= mU(I \cos \psi \cos \theta + I \sin \psi \sin \theta) = \\ &= mU(I_q \cos \theta + I_d \sin \theta). \end{aligned}$$

Заместването на (9.22) в (9.23) дава окончателния израз за ъгловата характеристика на мощността:

$$(9.24) \quad P = \frac{mE_o U}{x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = P' + P''.$$

Тъй като $\Omega_1 = \text{const}$, от (9.20) се вижда, че зависимостта $M = f(\theta)$ ще бъде аналогична на зависимостта $P = f(\theta)$.

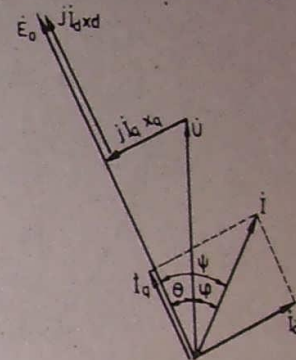
Неявнополюсна синхронна машина. Тъй като в случая $x_d = x_q$, от (9.24) следва, че

$$(9.25) \quad P = P' = \frac{mE_o U}{x_d} \sin \theta.$$

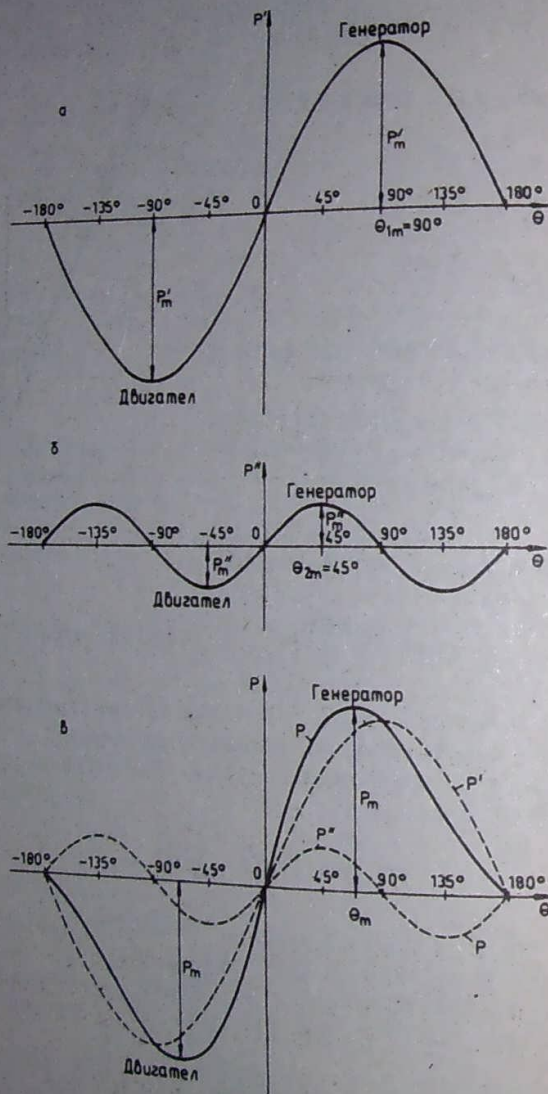
т. е. мощността P' е пропорционална на $\sin \theta$ и ъгловата характеристика има показания на фиг. 9.18 а вид. При отрицателни стойности на θ характеристиката се отнася за синхронен двигател. Мощността достига максималната си стойност P'_m при $|\theta| = |\theta'_m| = 90^\circ$.

Невъзбудена явнополюсна машина. Ако $I_s = 0$, то $E_o = 0$ и от (9.24) следва

$$(9.26) \quad P = P'' = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$



Фиг. 9.17. Векторна диаграма на явнополюсен синхронен генератор при $r_a = 0$



Фиг. 9.18. Ъглови характеристики на синхронна машина
 а — неявнополюсна машина; б — невъзбудена явнополюсна машина; в — възбудена явнополюсна машина

В случая мощността P'' е пропорционална на $\sin 2\theta$ и ъгловата характеристика има показания на фиг. 9.18 б вид. Мощността достига максималната си стойност P''_m при $|\theta| = \theta_m = 45^\circ$. Вижда се, че явнополюсната синхронна машина развива определена мощност и определен момент и тогава, когато $I_n = 0$. Развиваният момент се дължи на различните магнитни проводимости по надлъжната и напречната ос ($x_d > x_q$) и се нарича реактивен момент. Този факт се използва за изработване на синхронни реактивни машини — обикновено двигатели с неголяма мощност.

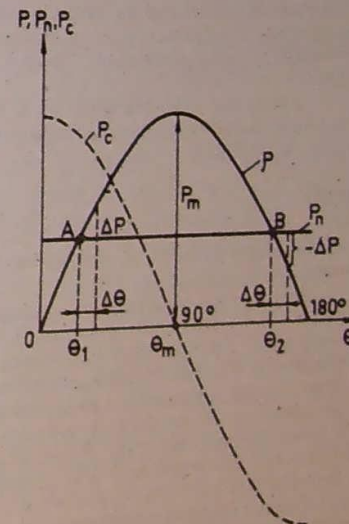
Възбудена явнополюсна машина. В случая и двете съставки на мощността в (9.24) са различни от нула. На фиг. 9.18 в е показана ъгловата характеристика $P = f(\theta)$, която се получава от наслагването на кривите $P' = f(\theta)$ и $P'' = f(\theta)$. Мощността, а следователно и моментът получават максималната си стойност при $\theta = \theta_m$, който е от порядъка на 75° .

9.8. Устойчивост на синхронната машина

Статична устойчивост на синхронната машина. На фиг. 9.19 е показана ъгловата характеристика $P = f(\theta)$ на не-явнополюсен синхронен генератор, както и мощността на първичния двигател P_n (права, успоредна на абсцисната ос, тъй като P_n не зависи от θ). В установен режим подаваната от първичния двигател мощност P_n и отдаваната от генератора мощност P трябва да са равни. Двете мощности са равни в пресечните точки А и В.

Устойчива работа е възможна само в т. А, което може да се обясни по следния начин. Нека поради случайна смущаваща причина роторът да се ускори и θ да нарасне с $\Delta\theta$. Тогава отдаваната от генератора мощност нараства с ΔP , а мощността P_n остава същата. Тъй като отдаваната от генератора мощност става по-голяма от подаваната, роторът ще се загормози, ъгъл θ ще намалява, докато се възстанови режимът, съответстващ на т. А. По аналогичен начин се доказва, че работата е устойчива и когато θ се намали с $\Delta\theta$.

Неустойчивостта на работата в т. В се обяснява по следния начин. Ако поради някаква причина роторът се ускори и θ получи положителен нарастък $\Delta\theta$, отдаваната мощност получава отрицателен нарастък $-\Delta P$. Тогава генераторът отдава по-малка мощност, отколкото получава от първичния двигател, което ще доведе до по-нататъшно ускоряване на ротора и генера-



Фиг. 9.19. Криви на зависимости P , P_n , $P_c = f(\theta)$ при не-явнополюсен синхронен генератор

отколкото получава от първичния двигател, което ще доведе до по-нататъшно ускоряване на ротора и генера-

торът ще излезе от синхронизма. Ако ъгъл θ се намали, поради нарушаване на равенството на мощностите този ъгъл ще продължи да се намалява, докато мощностите се изравнят в т. А.

Следователно работата на синхронния генератор е устойчива при $\theta \in (0, \theta_m)$ и неустойчива при $\theta \in (\theta_m, 180^\circ)$. По аналогичен начин може да се докаже, че синхронният двигател работи устойчиво при $\theta \in (0, -\theta_m)$.



Фиг. 9.20. Успокоителна намотка на явнополоусна синхронна машина

От казаното следва, че критерий за устойчива работа на синхронната машина е удовлетворяването на неравенството $\frac{\Delta P}{\Delta \theta} > 0$.

Синхронизираща мощност. Беше показано, че при малко отклонение $\Delta \theta$ от стойността на θ , съответстваща на даден установен режим, възниква разлика ΔP между отдаваната от машината и подадената към нея мощност, под действие на която машината възстановява синхронната си работа. За машината възстановява синхронната си работа.

Тази мощност ΔP се нарича **синхронизираща мощност**. Количествена оценка за това, доколко енергично синхронната машина се противопоставя на въздействията, които се стремят да я изведат от синхронизма, дава специфичната синхронизираща мощност

$$(9.27) \quad P_c \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta \theta} = \frac{dP}{d\theta}$$

Кривата на зависимостта $P_c / f(\theta)$ за неявнополоусна машина е дадена на фиг. 9.19 с прекъсната линия. Най-голяма е P_c при $\theta = 0$, намалява при увеличаване на θ , анулира се при $\theta = \theta_m$, а при $\theta > \theta_m$ се получава $P_c < 0$. Следователно машината работи стабилно при $P_c > 0$, а способността ѝ да поддържа синхронизма си е толкова по-голяма, колкото θ е по-малък. Обикновено при номинален товар $\theta_n = 20^\circ - 30^\circ$ и P_c има достатъчно голяма стойност.

Статична претоваряемост. Статичната претоваряемост на синхронната машина се определя от отношението на максималната P_m към номиналната P_n мощност:

$$(9.28) \quad k_n = \frac{P_m}{P_n}$$

Стойността на k_n е толкова по-голяма, колкото е по-малък θ_n . Обикновено $k_n = 1.7 - 2$.

Люлеење на синхронните машини. При промяна на товара се променя ъгъл θ , т. е. променя се положението на ротора спрямо въртящото се магнитно поле. Ако роторът е безинерционен, той би заел новото си положение моментно. В действителност поради инертността на въртящите се части преминаването на ротора към новото равновесно положение се съпровожда с колебания около това положение. Това явление се нарича **люлеење** на синхронната машина. Желателно е колебанията да затихват бързо. Ефективно средство за бързо затихване на колебанията е използването на **успокоителна намотка**.

Успокоителната намотка при явнополоусната машина (фиг. 9.20) се състои от електропроводящи пръчки, поставени в канали, които са шансовани в полюсните накрайници. Пръчките са свързани с накъсосъединяващи сегменти или пръстени. При неявнополоусните машини за образуване на успокоителната намотка се използват клиновете, затварящи каналите на избуздителната намотка. Клиновете се изработват от висококачествен бронз, като краищата им се свързват накъс със специални бандажи, които покриват четините съединения на възбудителната намотка.

Действието на успокоителната намотка е следното. При липса на люлеење роторът се върти синхронно с магнитното поле във въздушната междина, в успокоителната намотка не се индукира ток и тя не създава никакъв момент. При люлеење на ротора успокоителната намотка се премества с определена релативна скорост спрямо полето, в нея се индукират токове, при поставяне на причината, която ги е създавала, в случая люлеењето. По този начин колебанията бързо затихват.

При синхронни машини с масивни ротори колебанията затихват благодарение на действието на вихровите токове, индукирани в стоманата на ротора.

9.9. Синхронни двигатели с електромагнитно възбуждане

Общи сведения. По конструкция синхронните двигатели с електромагнитно възбуждане са аналогични на синхронните генератори. Статорната намотка е трифазна. Роторът обикновено има явно изразени полюси. В каналите на полюсните накрайници е поставена пускова намотка, аналогична на успокоителната намотка на синхронния генератор (фиг. 9.20).

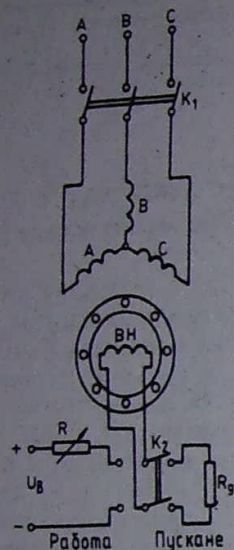
Основното предимство на разглежданите двигатели е, че при определено възбуждане могат да работят с $\cos \varphi = 1$, т. е. консумират само активна мощност, без да консумират никаква реактивна мощност. При превъзбуждане двигателят консумира активна мощност и отдава в мрежата реактивна индуктивна мощност, с което се подобрява коефициентът на мощността на мрежата и се намаляват падът на напрежение и загубите в нея.

Пускане на двигателите с електромагнитно възбуждане. Синхронните двигатели нямат начален пусков момент, тъй като роторът поради своята инертност не може веднага да бъде увлечен от въртящото се магнитно поле на статора, честотата на въртене на което се установява мигновено след включването. Затова за пускане на тези двигатели се използват специални методи: със спомагателен двигател, честотно пускане, асинхронно пускане.

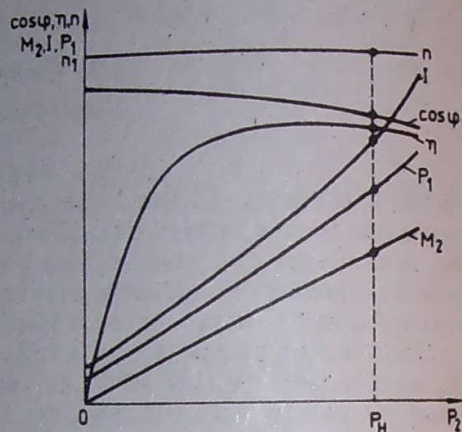
1. Пускане със спомагателен двигател. Процесът на пускането протича аналогично на процеса включване на синхронен генератор в паралелна работа. Синхронният двигател се развърта от спомагателен двигател до синхронната честота на въртене, синхронизира се (изпълняват се условията за паралелна работа) и се включва към мрежата. След това спомагателният двигател е изключва. Обикновено мощността на спомагателния двигател е 5—15% от мощността на синхронния двигател. Затова методът се използва за пускане на ненадтоварени или слабо натоварени синхронни двигатели.

2. Честотно пускане. Синхронният двигател се захранва с нап-

режение, чиято честота се изменя плавно от нула до номиналната стойност. При това двигателят ще се върти синхронно с честотата на пусков период. За източник на такова напрежение се използва отделен синхронен генератор, чиято честота на въртене се



Фиг. 9.21. Асинхронно пускане на трифазен синхронен двигател



Фиг. 9.22. Работни характеристики на синхронен двигател

изменя плавно от първичния му двигател. Методът се използва само в специални случаи.

3. **Асинхронно пускане.** Това е най-често използваният метод. Синхронният двигател с нахъсоединена пускова намотка в ротора се пуска в ход като асинхронен (фиг. 9.21).

За да се избегнат големите пренапрежения във възбудителната намотка, предварително тя се включва към резистор със съпротивление, около 10 пъти по-голямо от собственото ѝ съпротивление. Включва се двигателят към мрежата, при което възниква въртящо се магнитно поле. От взаимодействието на полето с индуктираните от него токове в пусковата намотка се създава асинхронен момент, който завърта ротора по посока на въртене на полето. Когато честотата на въртене на ротора достигне около 95 % от синхронната, възбудителната намотка се включва към постояннооточния източник. При това от взаимодействието на въртящото се магнитно поле и поляризираните полюси възниква синхронизиращ момент, благодарение на който двигателят влиза в синхронизъм. След това пусковата намотка изпълнява функ-

цията на успокоителна намотка, като спомага за бързото затихване на люлеенето на ротора.

Работни характеристики. Представяват зависимостите на честотата на въртене n , полезния момент M_2 , консумираната мощност P_1 , коефициента на мощността $\cos \varphi$, тока I и к. п. д. η от полезната мощност на двигателя P_2 при постоянни напрежение U , честота f и възбудителен ток I_n , т. е.

$n, M_2, P_1, \cos \varphi, I, \eta = f(P_2)$ при $U = U_n \text{ const}; f = f_n \text{ const}; I_n = \text{const}.$

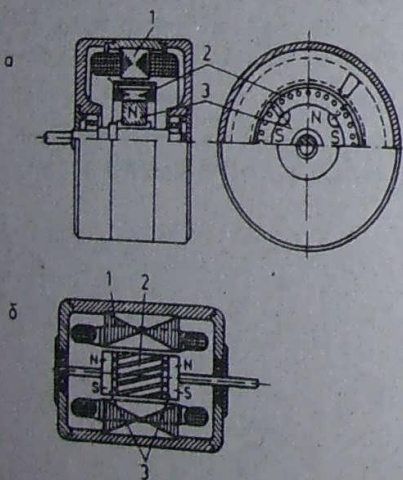
Работните характеристики са показани на фиг. 9.22.

Честотата на въртене на ротора n винаги е равна на синхронната честота на въртене $n_1 = \frac{f}{p} \text{ const}$. Затова графиката $n = f(P_2)$ е права, успоредна на абсцисната ос. Тъй като $M_2 = \frac{P_2}{2\pi n_1}$, а $n_1 = \text{const}$, графиката $M_2 = f(P_2)$ е права, минаваща през началото на координатната система. Консумираната мощност е $P_1 = P_2 + \Sigma p$. При увеличаване на натоварването P_2 растат и загубите Σp , поради което P_1 расте по-бързо от P_2 и графиката $P_1 = f(P_2)$ има криволинеен характер със закривяване нагоре. Кривата $\cos \varphi = f(P_2)$ зависи от възбудянето на двигателя при празен ход. Ако при празен ход $\cos \varphi_n = 1$, както е прието на фиг. 9.22, при увеличаване на натоварването $\cos \varphi$ се намалява. Кот-

венният ток е $I = \frac{P_1}{mU \cos \varphi}$. Оттук следва, че при увеличаване на натоварването I расте по-бързо от P_1 поради намаляването на $\cos \varphi$. Кривата $\eta = f(P_2)$ има типичния за всички електрически машини вид.

10.1. Магнитоелектрични
синхронни двигатели

Общи сведения. Статорът на тези двигатели не се различава от статора на синхронния и асинхронния двигател. Те се възбуждат с постоянни магнити, разположени на ротора. Постоянните магнити се изработват от материал с голям коерцитивен интензитет, като ални, алнико, бариев или стронциев ферит и др. Изпълняват се за малки мощности (до няколко стотици ватове).



Фиг. 10.1. Магнитоелектрични двигатели с радиално (а) и аксиално (б) разположение на постоянните магнити
1—статор; 2—кафезен ротор; 3—постоянен магнит

цилиндър и се закрепва към външната повърхност на явно изразените полюси на постоянния магнит. В цилиндъра се правят междуполусни прорези, за да се избегне шунтирането на магнитния поток на постоянния магнит.

Най-широко разпространение имат две конструктивни изпълнения: а) с радиално разположение на постоянните магнити; б) с аксиално разположение на постоянните магнити. И при двете изпълнения роторът съчетава елементи на синхронния двигател (постоянните магнити) и елементи на асинхронния двигател (накъсосъединена кафезна намотка).

При радиално разположение на постоянните магнити (фиг. 10.1 а) роторният пакет с кафезна намотка е изпълнен във вид на кух

При аксиално разположение на постоянните магнити (фиг. 10.1 б) конструкцията на ротора е аналогична на конструкцията на ротора на асинхронен накъсосъединен двигател. Към челните части на този ротор са закрепени пръстеновидни постоянни магнити, намагнитени радиално.

Принцип на действие. Пускането на магнитоелектричните двигатели е асинхронно. При включване на статорната намотка към захранващото напрежение преминаващият през нея ток възбужда въртящо се магнитно поле. Полето индутира в кафезната намотка е. д. н. и тъй като тя е затворена накъсо, през нея преминава ток. От взаимодействието на този ток с въртящото се магнитно поле се създава асинхронен въртящ момент, който завърта ротора в посоката, в която се върти полето. При честота на въртене, близка до синхронната ($n \approx 0,95n_1$), от взаимодействието между полюсите на постоянния магнит и въртящото се магнитно поле възникват сили, които разлюляват ротора около асинхронната честота на въртене и той със скок влиза в синхронизъм. По-нататък роторът продължава да се върти със синхронна честота под действие на синхронния момент, а асинхронният момент става равен на нула, тъй като хлъзгането $s = 0$. При изменение на натоварването роторът ще се върти синхронно, но ще се изменя ъгъл θ (между оста на полюсите и оста на резултатното магнитно поле). При синхронна работа на двигателя кафезната намотка играе ролята на успокоителна намотка (успокоява люлеенето на ротора, което се получава при промяна на режима). Ако двигателят се претовари, той ще излезе от синхронизъм, но няма да спре, както би се получило при липса на кафезна намотка. Двигателят ще работи като асинхронен с хлъзгане, при което се получава равновесие между асинхронния двигателен момент и съпротивителния момент. След отстраняване на претоварването двигателят отново влиза в синхронизъм.

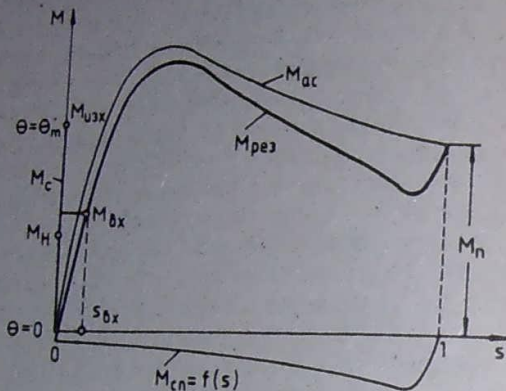
Механична характеристика. Тя дава зависимостта на въртящия момент от хлъзгането. При разглежданите двигатели тя е комбинация от две механични характеристики — на асинхронен и на синхронен двигател (фиг. 10.2). На фигурата са показани кривите на следните въртящи моменти:

$M_{ас} f(s)$ — асинхронен момент, който възниква в резултат на взаимодействието на въртящото се магнитно поле с индутираните от него токове в кафезната намотка. Индутираното в нея е. д. н. E_{2s} е пропорционално на s . Както е известно, кривата има максимум при малки стойности на s .

$M_{сн} f(s)$ — спиращен момент. В процеса на развъртането на двигателя постоянните магнити индутират в статорната намотка е. д. н. E_{1n} с честота $f_{1n} = p n_1 \cdot f_1 (1-s)$. За е. д. н. E_{1n} намотката на статора, която обикновено е присъединена към достатъчно мощен източник, може да се счита затворена накъсо. Затова под действие на E_{1n} в статорната намотка преминава ток I_{1n} , който

при взаимодействие с полето на постоянните магнити създава спиращия момент $M_{сп}$. Този момент също е асинхронен и има максимум при малки стойности на $(1-s)$.

$M_{рез}/(s)$ — резултатен асинхронен момент, който представлява алгебричната сума от $M_{ас}$ и $M_{сп}$. Както се вижда, $M_{сп}$ влошава пусковите качества на двигателя, тъй като се получава провал в кривата на момента при малки честоти на въртене. Ако съпротивителният момент е по-голям от минималния момент в



Фиг. 10.2. Механична характеристика на магнитоелектричен синхронен двигател

мястото на провала, двигателят ще „заседне“ на ниската честота на въртене и няма да може да се развърти.

$M_c = f(s)$ — синхронен момент, който се получава от взаимодействието на статорното въртящо се поле и полето на постоянните магнити. M_c не зависи от s , съответно от n . Големината му се променя при промяна на натоварването, при което се изменя ъгъл θ от 0 до θ_m , но честотата на въртене остава равна на синхронната, съответно хлъзгането е нула.

Магнитоелектричните (също и другите видове) синхронни двигатели се характеризират с три основни момента (фиг. 10.2):

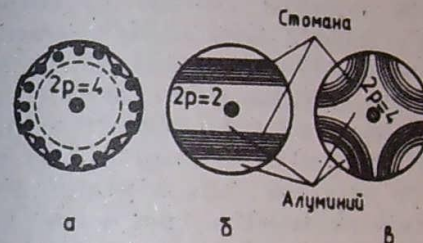
Пусков момент M_H — асинхронен момент, развиван от двигателя при $s = 1$.

Входящ момент $M_{вх}$ — също асинхронен момент, равен на най-големия съпротивителен момент на вала на двигателя, при който той все още може да влезе в синхронизъм. Зависи от максималната честота на въртене, до която двигателят достига в асинхронен режим при даден съпротивителен момент, от синхронния момент и от инерционния момент на въртящите се части.

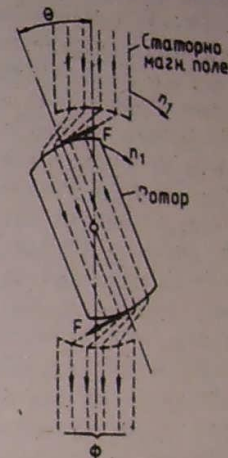
Изходящ момент $M_{изх}$ — синхронен момент, равен на максималния съпротивителен момент на вала на двигателя, при който той все още е в синхронизъм.

10.2. Синхронни реактивни двигатели

Общи сведения. Статорът на тези двигатели не се различава от статора на синхронните и асинхронните двигатели. Отличителна особеност на синхронния реактивен двигател е липсата на възбуждане от страна на ротора. Основният магнитен поток се възбужда изключително от м. д. н. на статора.



Фиг. 10.3. Конструкции на ротори на синхронни реактивни двигатели



Фиг. 10.4. Принцип на създаването на реактивния момент

Принципната възможност за изработване на такива двигатели следва от факта, че невъзбудената явнополюсна синхронна машина развива определен момент, наречен *реактивен момент*, който съгласно (9.20) и (9.26) се определя от изрза

$$(10.1) \quad M_p = \frac{mU^2}{2\Omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

От (10.1) се вижда, че M_p е пропорционален на разликата $\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right)$, т. е. на разликата $(R_{mq} + R_{md})$ на магнитните съпротивления по напречната и надлъжната ос. Това обстоятелство определя необходимостта роторът да бъде изпълнен така, че *магнитните съпротивления по двете оси да бъдат различни*, а разликата им да е достатъчно голяма.

Различни конструкции на ротори на синхронни реактивни двигатели са показани на фиг. 10.3. Най-широко разпространение има роторът, показан на фиг. 10.3 а. Изработва се от листова

електротехническа стомана и е снабден с пускова кафезна намотка. Този ротор може да се получи от кафезния ротор на асинхронен двигател чрез фрезование на изрези. При това се получават ясно изразени полюси и магнитните съпротивления R_{mq} и R_{md} са различни. Роторите, показани на фиг. 10.3 б, в, се изработват чрез заливане на стоманени пакети с алуминий, при което алуминият играе ролята на пускова намотка.

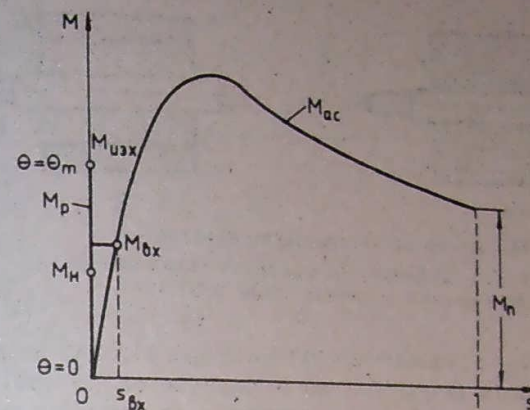
Създаването на реактивния момент може да се обясни и по следния начин. Роторът с различни магнитни съпротивления по надлъжната и напречната ос се стреми да се ориентира така, че магнитното съпротивление за силовите линии на полето да бъде минимално, вследствие на което възникват електромагнитни сили F (фиг. 10.4), създаващи въртящ момент, под действие на който роторът се върти в същата посока и със същата честота на въртене n_1 , както и статорното поле.

Принцип на действие. При включване на статорната намотка към захранващото напрежение възниква въртящо се магнитно поле, което индутира ток в пусковата намотка. От взаимодействието на този ток с въртящото се магнитно поле се създава асинхронен въртящ момент, под действие на който двигателят се развърта, т. е. пускането е асинхронно. Когато честотата на въртене достигне около 95% от синхронната честота, от взаимодействието на въртящото се магнитно поле и невъзбудените полюси на ротора възникват сили на магнитно привличане, които разлюляват ротора около асинхронната честота на въртене и той със скок влиза в синхронизъм. След това двигателят се върти със синхронна честота на въртене под действие на реактивния момент, асинхронният момент е равен на нула, тъй като хлъзгането $s = 0$, а пусковата намотка играе ролята на успокоителна намотка.

Механична характеристика. Представлява зависимостта на въртящия момент от хлъзгането и е комбинация от механичната характеристика $M_{ac} = f(s)$ на асинхронен двигател и механичната характеристика $M_p = f(s)$ на синхронен реактивен двигател (фиг. 10.5). На фигурата са показани трите характерни момента M_n , M_{bx} и $M_{изх}$, същността на които беше изяснена в т. 10.1. Реактивният момент M_p не зависи от s . При изменение на натоварването се изменя ъгъл θ (между оста на резултатното магнитно поле и оста на роторните полюси). При всяко натоварване се установява ъгъл θ , при който развиваният от двигателя момент и съпротивителният момент на вала му се уравновесяват. Натоварването двигателят излиза от синхронизъм и роторът му ще се върти асинхронно. Ако натоварването се намали, двигателят отново влиза в синхронизъм.

От (10.1) следва, че $\theta_m = 45^\circ$, но изразът е изведен при допускането, че активното съпротивление на статорната намотка

$r_a = 0$. При маломощните двигатели, каквито са обикновено синхронните реактивни двигатели, r_a има значителна стойност. При отчитане на r_a се установява, че максималната стойност на реактивния момент $M_{изх}$ се намалява, намалява се и θ_m , като обикновено $\theta_m = 30 \div 40^\circ$.



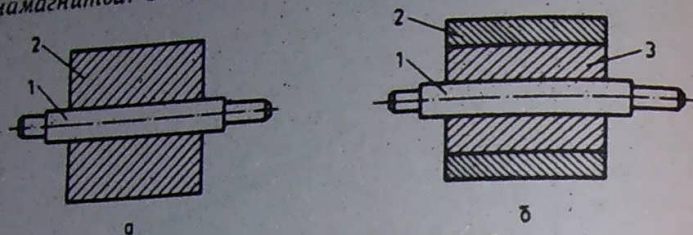
Фиг. 10.5. Механична характеристика на синхронен реактивен двигател.

10.3. Синхронни хистерезисни двигатели

Общи сведения. Статорът на хистерезисния двигател е аналогичен на статора на обикновена променливотокова машина. Статорната намотка е трифазна или двуфазна (с кондензатор в едната фаза). Активната част на ротора се изработва от магнитно твърд материал с широк хистерезисен цикъл. Обикновено се използва сплавта викалой. Разликата между двигателите с постоянни магнити и хистерезисните двигатели е, че в първите роторът се подлага на специално *предварително намагнитване*, а във вторите роторът се намагнитва *от статорното магнитно поле*. Роторът има едно от конструктивните изпълнения, показани на фиг. 10.6 а, б. При изпълнението, показано на фиг. 10.6 б, се получава икономия на сравнително скъпия магнитно твърд материал. И при двете изпълнения цилиндърът от магнитно твърд материал може да бъде масивен или шихтован.

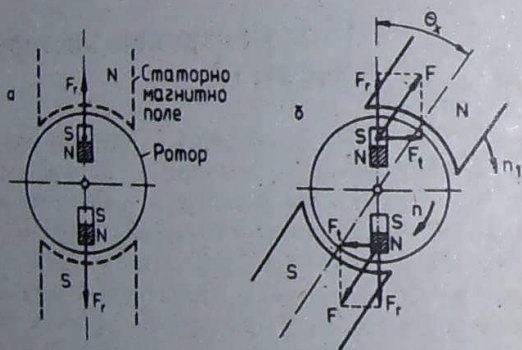
Принцип на действие и механична характеристика. Най-напред разглеждаме двигател с *шихтован ротор*. Хистерезисният момент се създава от взаимодействието на въртящото се магнитно поле, възбудено от статорната намотка, и магнитното поле на ротора, възникващо в резултат на неговото намагнитване от статорното поле.

Да изясним физическата същност на хистерезисния момент $M_{хх}$, който се получава в асинхронен режим ($0 \leq n < n_1$, т. е. $1 \geq s > 0$), при който материалът на ротора непрекъснато се пренамагнитва. За целта статорното магнитно поле се представя



Фиг. 10.6. Ротор на хистерезисен двигател
1 — вал; 2 — цилиндър от магнитно твърд материал;
3 — носеща втулка от стомана или алуминий

с два полюса $N-S$, между които се намира роторът на двигателя. Когато статорното (външното по отношение на ротора) магнитно поле е неподвижно (фиг. 10.7 а), роторът се намагнитва, като неговите елементарни магнити (домени) се ориентират по външното поле. От взаимодействието на статорното и роторното поле (сумар-



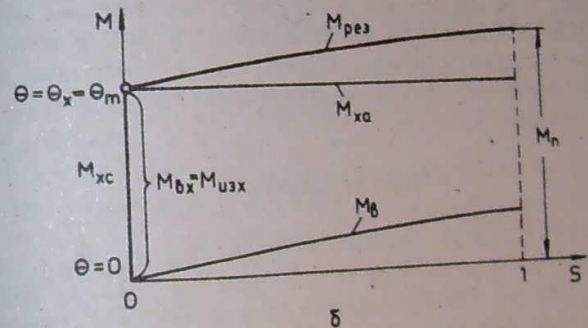
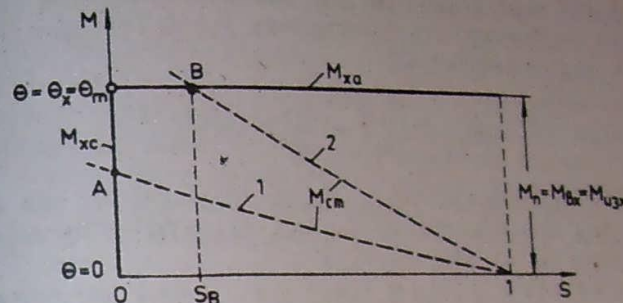
Фиг. 10.7. Създаване на хистерезисния въртящ момент

ното поле на всички елементарни магнити) възникват радиални сили F_r , които не създават въртящ момент.

При завъртане на статорното поле в определена посока в същата посока ще се стремят да се завъртят и елементарните магнити на ротора. Обаче поради повишеното молекулярно триене при магнитно твърдите елементарни роторни магнити ще изостават със своята ориентация спрямо външното магнитно поле. Затова във всеки момент от времето роторното поле ще изостава пространствено на ъгъл θ_x (ъгъл на хистерезисното изо-

ставане) от външното поле (фиг. 10.7 б). Силата на взаимодействие F между полетата на статора и ротора вече ще има както радиална F_r , $F \cos \theta_x$, така и тангенциална F_t , $F \sin \theta_x$ съставка. Последната създава хистерезисния момент при асинхронно въртене

$$M_{ха} = M_{хат} \sin \theta_x.$$



Фиг. 10.8. Механична характеристика на хистерезисен двигател с шихтован (а) и с масивен (б) ротор

тъй като θ_x зависи само от магнитните свойства на магнитно твърдия материал, при даден ротор $M_{ха} = \text{const}$, т. е. не зависи от честотата на въртене n , съответно от хлъзгането s .

Последният извод може да се потвърди по следния начин. Както е известно от теоретичната електротехника, загубите от хистерезис, възникващи при циклично пренамагнитване на даден феромагнитен материал, са пропорционални на честотата на пренамагнитване (ако $\Phi = \text{const}$). От теорията на асинхронните машини е известно, че честотата на пренамагнитване на ротора е $f_2 = sf_1$. Следователно загубите от хистерезис p_x в ротора може да се представят по следния начин:

$$(10.4)$$

$$p_x = sp_{x1},$$

където с p_{x1} са означени загубите при $s=1$ ($n=0$).

Електромагнитната мощност $P_{\Delta\lambda}$, която се предава през магнитното поле от статора към ротора, е равна на загубите в ротора (в случая p_x), разделени на хлъзгането s :

$$(10.5) \quad P_{\Delta\lambda} = \frac{p_x}{s} = \frac{s p_{x1}}{s} = p_{x1} = \text{const.}$$

Хистерезисният момент $M_{\Delta\lambda}$, развиван от двигателя, се получава, като електромагнитната мощност $P_{\Delta\lambda}$ се разделя на синхронната ъглова скорост Ω_1 :

$$(10.6) \quad M_{\Delta\lambda} = \frac{P_{\Delta\lambda}}{\Omega_1} = \frac{p_{x1}}{\Omega_1} = \text{const.}$$

На фиг. 10.9а механичната характеристика на хистерезисния двигател при асинхронно въртене $M_{\Delta\lambda} = f(s)$ е представена с права, успоредна на абсцисната ос.

В синхронен режим ($s=0$), т. е. $n=n_1$) магнитните полета на статора и ротора се въртят синхронно и няма намагнитване на материала на ротора. Магнитното поле на ротора е постоянно и се дължи на остатъчния магнетизъм. Въртящият момент на хистерезисния двигател при синхронно въртене $M_{\Delta\lambda}$ се създава както при синхронните двигатели с постоянни магнити от взаимодействието на синхронно въртящите се статорно и роторно магнитни полета, като

$$M_{\Delta\lambda} = M_{\Delta\lambda m} \sin \theta,$$

където θ е ъгълът между статорното и роторното поле. Докато $\theta_{\Delta\lambda} = \text{const.}$, ъгъл θ се променя при промяна на натоварването на двигателя. На фиг. 10.8а е показана механичната характеристика на двигателя при синхронно въртене $M_{\Delta\lambda} = f(s)$. При изменение на натоварването ъгъл θ се изменя в границите от 0 до $\theta_{\Delta\lambda} = \theta_m$. Обикновено $\theta_{\Delta\lambda} = \theta_m = 20^\circ \div 35^\circ$. Следователно най-голямата стойност на момента $M_{\Delta\lambda m}$, развиван от двигателя в синхронен режим, е равна на $M_{\Delta\lambda}$.

От казаното следва, че хистерезисният двигател развива въртящ момент и при асинхронна, и при синхронна честота на въртене. Режимът на неговата работа зависи от големината и характера на статичния съпротивителен момент $M_{\text{ст}}$ на вала на двигателя (вж. фиг. 10.8а). Ако в целия диапазон на хлъзганията от 1 до 0 съпротивителният момент е по-малък от $M_{\Delta\lambda}$ (крива 1), двигателят работи в синхронен режим. Оста на роторното поле ще изостава от оста на статорното поле на ъгъл θ , съответстващ на т. А, при който $M_{\Delta\lambda} = M_{\text{ст}}$. Ако съпротивителният момент се изменя по кривата 2, двигателят работи в асинхронен режим с хлъзгане $s_{\Delta\lambda}$, съответстващо на т. В, при което $M_{\Delta\lambda} = M_{\text{ст}}$. Обаче използването на хистерезисния двигател в асинхронен

режим не е икономично поради големите загуби от намагнитване на ротора, особено при големи хлъзгания—вж. (10.4.) От фиг. 10.8а се вижда, че пусковият момент $M_{\Delta\lambda}$, моментът момент $M_{\text{изх}}$ при разглеждания двигател са еднакви (при пренебрегване на r_a).

Дотук беше разгледан хистерезисен двигател с шихтован ротор. Ако двигателят е с **масивен ротор**, при работа в асинхронен режим въртящото се статорно магнитно поле индуцира в ротора поле възниква момент на вихровите токове M_v , който по същество е **асинхронен момент**. При $s=0$ моментът $M_v=0$. Тъй като активното съпротивление на ротора е голямо, критичното хлъзгане $s_m > 1$ и затова M_v е най-голям при $s=1$. На фиг. 10.8б е показана механичната характеристика на хистерезисен двигател с масивен ротор. Резултатният момент при асинхронно въртене $M_{\text{рез}}$ е равен на сумата от моментите $M_{\Delta\lambda}$ и M_v .

10.4 Стъпкови двигатели

Общи сведения. Стъпковите двигатели служат за преобразуване на електрически сигнали (напрежителни импулси) в ъгъл на завъртане.

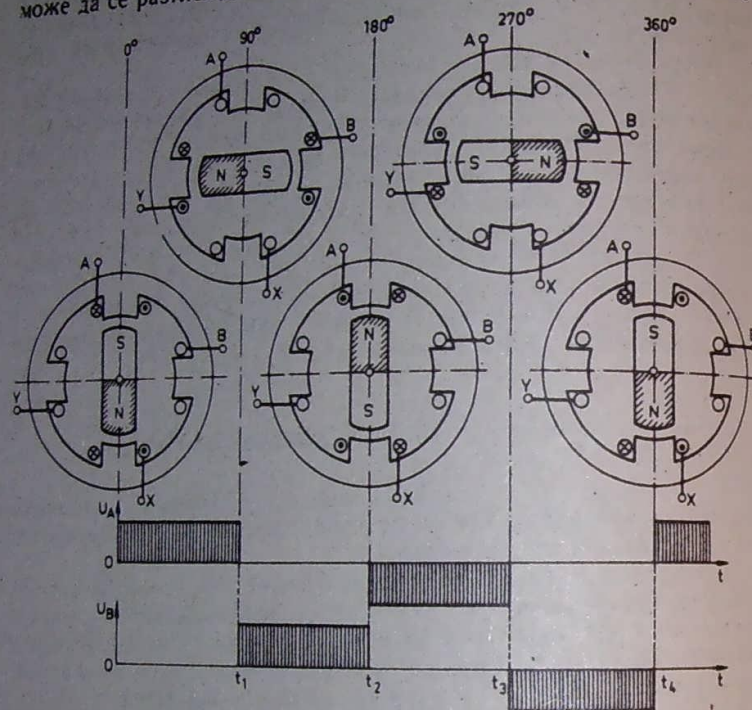
Статорният пакет на стъпковия двигател се изработва от листовата електротехническа стомана и в неговите канали се поставят определен брой управляващи намотки. Броят на управляващите намотки (фазите) m може да бъде различен, но най-голямо разпространение имат дву-, три- и четирифазни двигатели.

Роторът е или **активен**, изработен от постоянен магнит, или **реактивен**, изработен от магнитно мек материал.

Стъпковият двигател работи съвместно с електронен **комутатор**, който подава на управляващите намотки правоъгълни напрежителни импулси с определена последователност и честота. Под действие на всеки такъв импулс роторът се завърта на точно определен ъгъл — **стъпка**.

Превключването на управляващите намотки се нарича **комутация**. Броят на състоянията на комутатора, които обезпечават ново ъглово положение на статорния магнитен поток в рамките на 360° , се нарича брой на тактовете k . В зависимост от поляритета на напрежителните импулси комутацията може да бъде еднополярна и разнополярна. Според броя на **едновременно включените** управляващи намотки на всеки такт комутацията е симетрична и несиметрична. Комутацията се нарича **симетрична**, ако на всички тактове се включват еднакъв брой управляващи намотки (поединично, по две, по три и т. н.).

При несиметрична комутация на различните тактове се включват различен брой управляващи намотки. В общ случай стълковият двигател и електронният комутатор може да се разглеждат като система за честотно регулиране на че-



Фиг. 10.9. Принцип на работа на стълков двигател с активен ротор при симетрична комутация

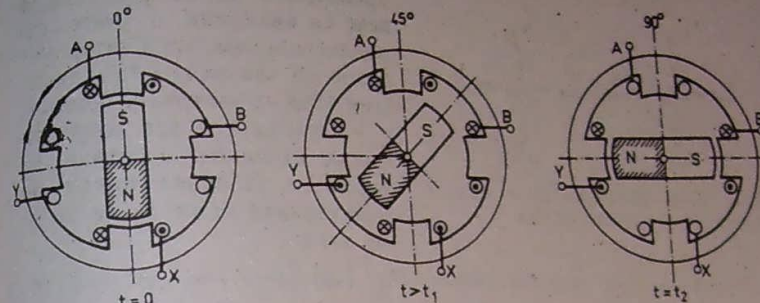
стотата на въртене на синхронен двигател, отличаваща се с дискретното захранване на намотките с правоъгълни напрежителни импулси и възможности за фиксиране на ъгловото положение на ротора. Тъй като на определен брой импулси съответствува точно определен ъгъл на завъртане, с помощта на стълков двигател може да се създаде отворена система за автоматично управление без обратна връзка по ъглова скорост и положение, която е по-проста от затворената.

Стълковите двигатели се използват в системите за програмно управление на електрозадвиженията (например на металорежещи машини), в изчислителните машини, за дистанционно предаване на ъгъл и др.

Освен въртящи се приложения имат и линейни стълковы дви-

гатели, които пресобразуват напрежителни импулси директно в линейно преместване.

Стълковы двигатели с активен ротор. Статорът на този двигател има явно изразени полюси, върху които се поставят управ-



Фиг. 10.10. Принцип на работа на стълков двигател с активен ротор при несиметрична комутация

ляващите намотки. Броят на полюсите на всяка управляваща намотка е равен на броя на полюсите на ротора. Роторът е изработен от постоянен магнит.

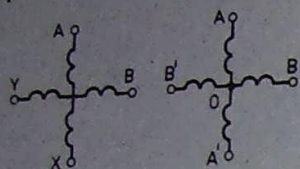
За изясняване на принципа на действие на стълковите двигатели с активен ротор се разглежда показаният на фиг. 10.9 двуполусен ($2p=2$), двуфазен ($m=2$) двигател при симетрична разнополярна комутация. В момента $t=0$ се подава напрежение на управляващата намотка A и се създава магнитен поток по оста Y , в резултат на което роторът се разполага по същата ос. В момента t_1 се изключва намотката A и се подава напрежение на намотката B. Оста на статорния поток се завърта на 90° и под действие на възникналия синхронизиращ момент роторът се завърта на същия ъгъл, т. е. стъпката е 90° . В момента t_2 се подава напрежение на намотката A с обратен поляритет, в момента t_3 — напрежение на намотката B с обратен поляритет, като при по-даването на всеки импулс роторът се завърта на 90° . В момента t_4 отново се подава напрежителен импулс на намотка A и роторът заема изходното положение. Действието на двигателя се обяснява със стремеше на ротора да заеме такова положение, при което посоката на неговото магнитно поле съвпада с посоката на статорното поле. Накратко превключването на управляващите намотки може да се запише по следния начин:

$$(+A) \rightarrow (+B) \rightarrow (-A) \rightarrow (-B) \rightarrow \dots$$

В случая на всеки такт е включена по една намотка и затова комутацията е симетрична.

На фиг. 10.10 е показана работата на двигателя от фиг. 10.9,

при условие че комутацията е несиметрична — при нечетните тактове е включена една управляваща намотка, а при четните са включени двете намотки. В момента $t=0$ е включена само фаза А и роторът заема показаното положение. В момента t_1 се подава напрежение и на фаза В, така че вече са включени и двете управляващи намотки. Статорният поток се завърта на 45° , на същия ъгъл се завърта и роторът, т. е. стъпката е два пъти по-малка отколкото в случая на фиг. 10.9. Пълният цикъл на комутацията може да се запише така:



Фиг. 10.11. Двухазна (а) и четири-фазна (б) статорна намотка

$$\begin{aligned} & (+A) \rightarrow (+A; +B) \rightarrow (+B) \rightarrow (-A; +B) \rightarrow (-A) \rightarrow (-A; -B) \rightarrow \\ & \rightarrow (-B) \rightarrow (+A; -B) \rightarrow \dots \end{aligned}$$

Стъпката на двигателя с активен ротор е

$$(10.7) \quad \alpha = \frac{360^\circ}{pk}$$

Броят на тактовете е

$$(10.8) \quad k = mk_1k_2$$

където

k_1 — коефициент, равен на 1 при симетрична комутация и на 2 при несиметрична комутация;

k_2 — коефициент, равен на 1 при еднополярна и на 2 при разнополярна комутация.

За случаите на фиг. 10.9 и 10.10 се получава съответно

$$\alpha = \frac{360^\circ}{pmk_1k_2} = \frac{360^\circ}{1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2} = 90^\circ; \quad \alpha = \frac{360^\circ}{1 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2} = 45^\circ.$$

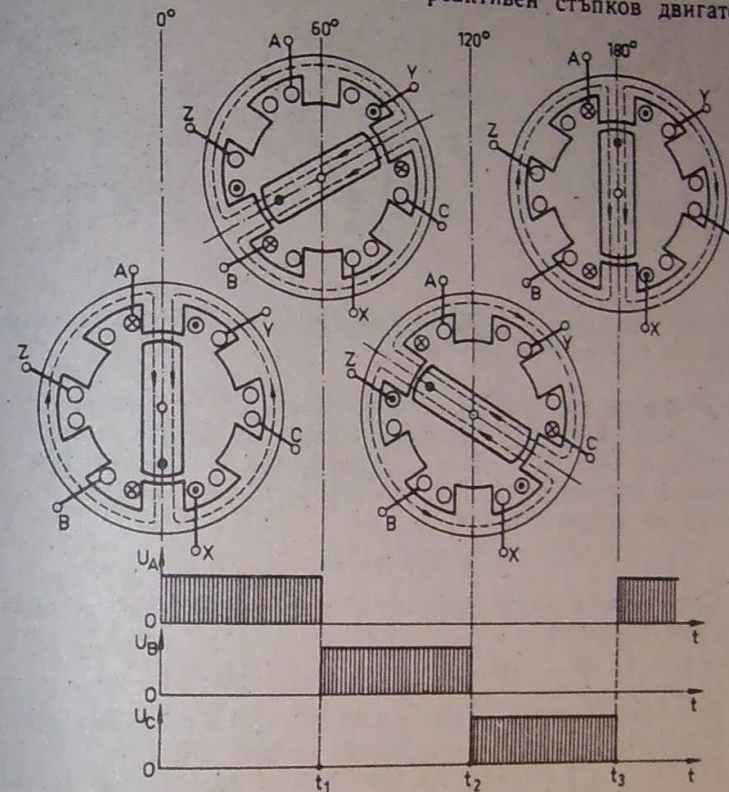
Стъпката на двигателя с активен ротор може да бъде намалена чрез увеличаване на броя на двойките полюси p . Увеличаването на p при даден диаметър на ротора е ограничено от технологичните възможности и затова стъпката на разглежданите двигатели е сравнително голяма ($15 \div 45^\circ$).

На фиг. 10.9 и 10.10 намотките на срещулежащите полюси са свързани последователно, което схематично е показано на фиг. 10.11 а и броят на фазите е $m=2$. Често намотките на четирите полюса се свързват в четириъгълна звезда с изведена обща точка О, както е показано на фиг. 10.11 б. В този случай броят на фазите е $m=4$. Предимство на тази схема е, че тя се управлява с еднополярни импулси, което опростява конструкцията на елек-

тронния комутатор. Комутацията се извършва в следната последователност:

$$(A; B) \rightarrow (A'; B) \rightarrow (A'; B') \rightarrow (A; B') \rightarrow \dots$$

Стъпков двигател с реактивен ротор. На фиг. 10.12 е показано принципното устройство на реактивен стъпков двигател.

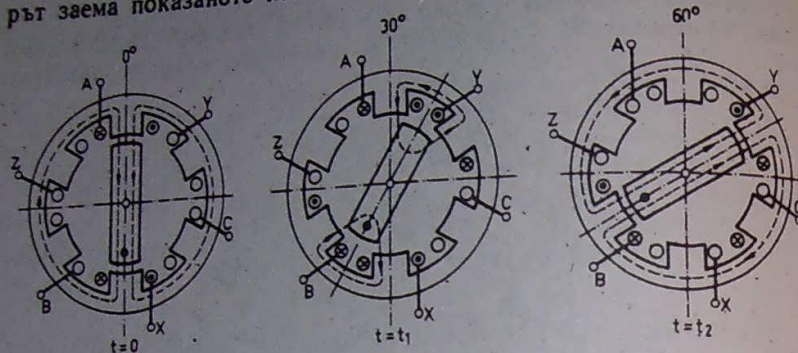


Фиг. 10.12. Принцип на работа на реактивен стъпков двигател при симетрична комутация

Статорът има явно изразени полюси. В статора има три управляващи намотки А, В, С, т. е. $m=3$. Намотката на всяка фаза се състои от две последователно свързани части, разположени на два срещулежащи полюса. Роторът е изработен от магнитно мек материал и в случая има два явно изразени полюса, но в общ случай броят им може да бъде по-голям.

Действието на реактивния двигател се обяснява със стремеше на ротора да заеме положение, при което магнитното съпротивление за статорния магнитен поток е минимално.

При симетрична комутация с поединично включване на управляващите намотки (фиг. 10.13) двигателят работи по следния начин. В момента $t=0$ е подадено напрежение на фаза А и роторът заема показаното положение, тъй като при него магнитното



Фиг. 10.13. Принцип на работа на реактивен стъпков двигател с едноосен ротор при несиметрична комутация

съпротивление е минимално. В моментите t_1 и t_2 се включват съответно фазите В и С. На всеки такт роторът се завърта на 60° , т. е. стъпката е 60° . За по-лесно проследяване на положението на ротора в единия му край е поставена точка. Комутацията се описва по следния начин:

$$(A) \rightarrow (B) \rightarrow (C) \rightarrow \dots$$

При едноосен ротор (фиг. 10.13) и несиметрична комутация в последователността

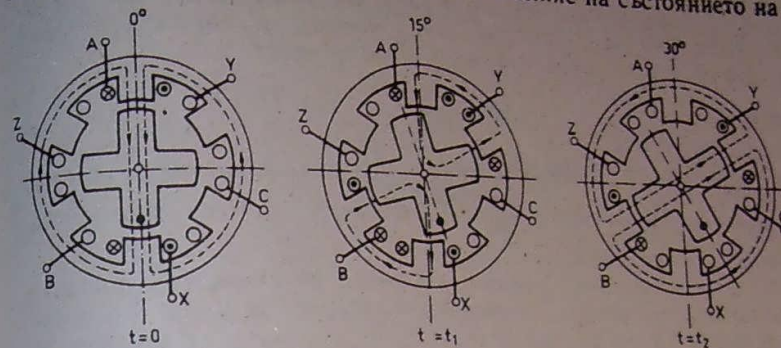
$$(A) \rightarrow (A; B) \rightarrow (B; B; C) \rightarrow (C; C; A) \rightarrow \dots$$

на всеки такт роторът се завърта на 30° , т. е. стъпката е два пъти по-малка в сравнение със случая на фиг. 10.12.

На фиг. 10.14 са показани три такта от работата на двигател с двуосен (кръстат) ротор при несиметрична комутация както в предишния случай. От фигурата се вижда, че стъпката вече е 15° . Следователно при увеличаване на броя на роторните зъби стъпката се намалява. По-нататъшно намаляване на стъпката може да се постигне, като се използва принципът на електромагнитното редуциране на скоростта (вж. т. 10.2), при което както роторът, така и статорните полюсни накрайници са зъбени.

Стъпката на реактивния двигател може да бъде определена с изрази (10.7) и (10.8), като в (10.7) се полага $p=Z_2$ — брой на роторните зъби, а в (10.8) коефициентът k_2 винаги е равен на единица. Казаното се обосновава по следния начин. В реактивния двигател периодът на изменение на магнитното съпротивление и на магнитното поле във въздушната междина съответству-

ва на завъртане на ротора спрямо статора на едно зъбно деление. Това означава, че зъб и канал на ротора са еквивалентни на двойка полюси, т. е. $p=Z_2$. Освен това в реактивния двигател изменението на посоката на полето на 180° не влияе на състоянието на



Фиг. 10.14. Принцип на работа на реактивен стъпков двигател с двуосен ротор при несиметрична комутация

ротора. Затова $k_2=1$ и при еднополярна, и при разнополярна комутация. Тъй като при еднополярна комутация електронният комутатор има по-проста конструкция, реактивните двигатели се захранват с еднополярни импулси. За фиг. 10.12, 10.13 и 10.14 стъпките са:

$$\alpha = \frac{360^\circ}{Z_2 m k_1 k_2} = \frac{360^\circ}{2 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 1} = 60^\circ; \quad \alpha = \frac{360^\circ}{2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1} = 30^\circ;$$

$$\alpha = \frac{360^\circ}{4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1} = 15^\circ.$$

Поради технологични ограничения възможният брой полюси на активния ротор е значително по-малък от възможния брой зъби на реактивния ротор. Затова реактивните двигатели могат да бъдат изпълнени със значително по-малка стъпка, която достига няколко градуса или части от градуса.

Реверсирането на стъпковите двигатели се извършва както при всички многофазни машини — чрез промяна на фазовия ред.

Режими на работа. За стъпковите двигатели са характерни следните основни режими.

Статичен режим. При този режим честотата на въртене е нула, а на намотките е подадено постоянно напрежение ($f=0$). Роторът се намира в устойчиво положение и е фиксиран от статорното магнитно поле. Ако с външна сила роторът се отклони на някакъв ъгъл θ от устойчивото му положение, той се съпротивлява на това със статичния електромагнитен момент, зависимостта на който от ъгъл θ представлява ъгловата характеристика (вж. т. 9.7).

Квазистатичен режим — режимът при отработване на отделни стъпки, който се характеризира с това, че преди отработването на следващата стъпка роторът трябва да премине в неподвижно състояние (да затихнат колебанията).

Установен динамичен режим. В случая управляващите импулси имат постоянна честота ($f = \text{const}$) и роторът се върти с постоянна средна ъглова скорост

$$(10.9) \quad \Omega = \frac{2\pi}{180} f,$$

като извършва колебания около моментната точка на устойчиво равновесие. Множителят $\frac{\pi}{180}$ е поставен в (10.9), за да се изрази стъпката в радиани.

Електромагнитният момент, развиван от стъпковия двигател при въртене на ротора, се нарича *динамичен момент*. Динамичният момент е по-малък от статичния, тъй като за времето на такта токът в управляващите намотки не успява да достигне установената си стойност поради индуктивността на намотките.

Преходен динамичен режим — основният експлоатационен режим на стъпковите двигатели, който включва пускане, спиране, реверсиране, преминаване от една честота към друга. При този режим ъгловата скорост на двигателя се променя. Един от важните параметри на стъпковите двигатели е честотата на *възприемчивост* $f_{\text{вп}}$ — максимална честота на следване на управляващите импулси, при която все още може да се осъществи пускане на двигателя без загуба на стъпка. Честотата на възприемчивост е толкова по-голяма, колкото са по-малки товарният момент и инерционният момент на въртящите се части. В съвременните стъпкови двигатели $f_{\text{вп}}$ при номинално натоварване достига 1000—1500 Hz.

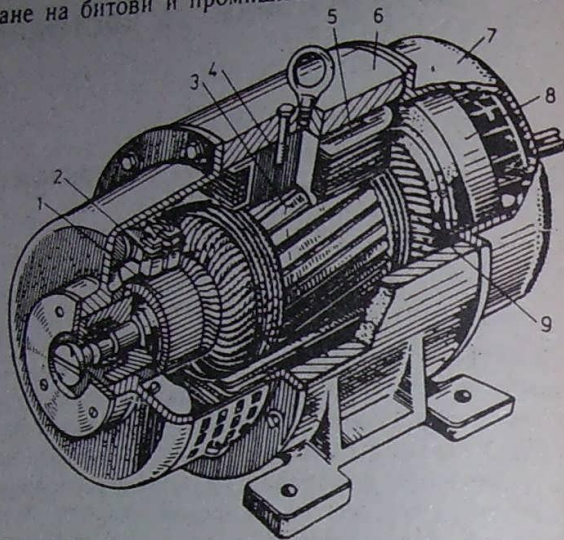
11 | Машини за постоянен ток

11.1. Област на приложение. Устройство

Машините за постоянен ток както всички електрически машини могат да извършват двата вида *електромеханично преобразуване* на енергията, т. е. да работят като генератор и като двигател. Бързото развитие на полупроводниковата техника създаде условия за замяната на постояннотоковите генератори с управляеми или неуправляеми токонпреобразователи в повечето области на промишлеността. Много голямо приложение имат двигателите за постоянен ток. Причина за това е, че в сравнение с другите типове електрически машини те притежават по-добри свойства за плавно регулиране на честотата на въртене в широки граници. Затова преобладаващата част регулируеми електрозадвижения са изпълнени с постояннотокови двигатели.

Двигателите за постоянен ток се разделят на две групи — колекторни и безколекторни (безконтактни). *Колекторните двигатели* са свързани към източника на постоянен ток чрез *електромеханичен преобразувател на честота*, който се състои от *колектор* и *четков апарат*. Между колектора и четките се осъществява плъзгащ се електрически контакт. Наличието на колектор и четки прави конструкцията на двигателите по-сложна и по-скъпа. Например при еднакви технически параметри един двигател за постоянен ток е около два-три пъти по-скъп от асинхронния двигател с кафезен ротор. Освен това при експлоатация се налага поддържане на колекторно-четковия възел, чиято безотказност и дълготрайност определят надеждността на цялата машина. Въпреки тези недостатъци двигателите за постоянен ток имат значително практическо приложение. Те се използват в електрическия транспорт (електрически локомотиви, трамвай, тролейбуси, метро), в металургията (прокатни двигатели, ролгангови двигатели, кранови двигатели и др.), в машиностроенето за главни и подавателни задвижения на металорежещи машини с цифрово-програмно управление, в превозни средства с автономно електрозахранване (електрокари,

електромобили), в добивната промишленост (за задвижване на багери, екскаватори, транспортни ленти), като гребни двигатели за задвижване на гребните винтове на кораби и подводници, за задвижване на битови и промишлени асансьори, за регулируеми



Фиг. 11.1. Устройство на електрическа машина за постоянен ток

1 — колектор; 2 — четки; 3 — котвен пакет; 4 — главен полюс; 5 — възбудителна намотка; 6 — статорно тяло; 7 — лагерен щит; 8 — вентилатор; 9 — котвена намотка

електрозадвижвания в текстилната, целулозната и химическата промишленост, в електрическите системи на автомобили и трактори (стартери и динама) и много други.

Съвременните двигатели за постоянен ток се изработват с най-различни номинални данни. Например мощността варира от няколко вата (при микродвигателите) до около 20 MW при някои крупни двигатели. Номиналното напрежение на двигателите с общо предназначение с малка и средна мощност е 220 V. Номиналното напрежение на крупните двигатели достига до 1000 V. Напрежението на двигателите за електрокари, стартерите и динамата е ниско, тъй като е равно на напрежението на акумулатора. Номиналната честота на въртене на изпълнените двигатели е най-различна — от няколко десетки до няколко хиляди обороти в минута. У нас се произвеждат специални типове постояннотокови машини: тягови и спомагателни двигатели за електрокари, трамвайни двигатели, високомоментни двигатели за металорежещи машини с ЦПУ, изпълнителни двигатели за периферни устройства на ЕИМ и др.

При безконтактните двигатели за постоянен ток колекторно-четковият възел е заменен с електронен комутатор. Затова отпадат недостатъците, проявяващи се при експлоатацията на колекторните двигатели, но значително се увеличава себестойността на електрозадвижването, поради което засега в регулируемите задвижвания се използват предимно колекторни двигатели. В перспектива се очаква в някои задвижвания (металорежещи машини с ЦПУ, манипулатори, роботи и др.) колекторните двигатели да бъдат постепенно изместени от безконтактните.

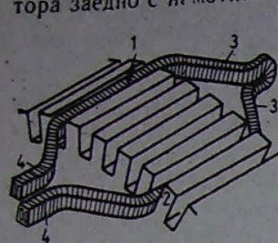
Устройство. Устройството на машина за постоянен ток е показано на фиг. 11.1. Статорното тяло 6 е основен конструктивен елемент, за който се закрепват останалите неподвижни части. От друга страна, то е част от магнитопровода и затова се изработва от стомана. Тялото има лапи с отвори за болтовете, с които машината се захваща към фундамента. Към вътрешната цилиндрична повърхност на статорното тяло с помощта на болтовете се притягат главните полюси 4, върху които са поставени полюсните бобини 5. Бобините са свързани така, че да се получи редуване на полярността на полюсите. Свързаните последователно полюсни бобини образуват възбудителната намотка.

Роторът (котвата) се състои от вал, пакет на котвата, котвена намотка и колектор. Пакетът на котвата 3 е набран от отделни листове електротехническа стомана с дебелина 0,5 mm. Листове са изолирани един от друг, за да се намалят загубите от вихрови токове, които се получават вследствие на цикличното намагнитване на котвата при въртенето ѝ в магнитното поле на полюсите. Листове на пакета са щанцовани така, че по външната цилиндрична повърхност на котвата се получават канали и зъби. Върху вала са монтирани лагери, които от своя страна са поставени в гнезда на лагерните щитове 7.

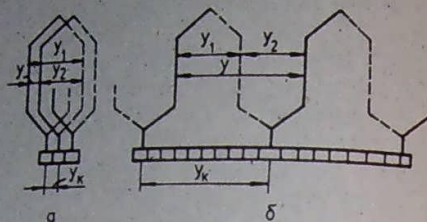
Котвената намотка 9 се състои от секции, изпълнени от изолирани медни проводници. Секциите са положени в каналите на котвата, от чиито стени са изолирани по подходящ начин. Краищата на секциите са запоени към пластините на колектора 1. Те са изработени от мед. Конструкцията на колектора позволява изолирането на колекторните пластини помежду им и от останалите части на ротора. Върху външната цилиндрична повърхност на колектора се трият четките 2, които се изработват от пресована графитна смес. С колектора и четките се осъществява свързването на въртящата се котвена намотка с външната мрежа.

Котвените намотки на постояннотоковите машини са двуслойни. Това означава, че във всеки канал на котвата се намират две секционни страни — долна и горна. Едната активна страна на дадена секция лежи в горния слой на един канал, а другата — в долния слой на друг канал (фиг. 11.2). При схематичното изобразяване на намотките секционните страни в горния слой се чертаят с пълна линия, а в долния слой — с прекъснатата линия.

При съставяне на схемите на котвените намотки и изучаване на явленията в тях често се използват т. нар. разгънати схеми. В този случай цилиндричните повърхности на котвата и колектора заедно с намотката се разгъват в плоскостта на чертежа.



Фиг. 11.2. Разположение на секциите и каналите на котвата
1 и 2 — горна и долна активна страна; 3 и 4 — челни съединения



Фиг. 11.3. Свързване на секциите на листовата (а) и на вълнова (б) намотка

В зависимост от начина на свързване на секциите една с друга и с колекторните пластини се различават два основни вида котвени намотки: *листова* (фиг. 11.3 а) и *вълнова* (фиг. 11.3 б). При двата вида намотки секциите се свързват последователно по такъв начин, че началото на всяка следваща секция заедно с края на предходната секция се свързва към обща колекторна пластина. Следователно броят на секциите S е равен на броя на колекторните пластини K .

По-долу са разгледани само проста листова и проста вълнова намотка, които се използват при машини с малка и средна мощност. За да могат да се съставят схемите им, най-напред се определят стъпките на намотката (фиг. 11.3).

Първата стъпка y_1 определя широчината на секцията. Тя представлява разстоянието между двете активни страни на една секция. Винаги когато е възможно, котвената намотка се изпълнява с диаметрална стъпка

$$(11.1) \quad y_1 \approx \frac{S}{2p}$$

Ако броят на секциите S не се дели без остатък на броя на полюсите $2p$, първата стъпка y_1 се закръглява на най-близкото цяло число. Всички секции са еднакво широки, т. е. имат една и съща стъпка y_1 .

Резултантната стъпка y е разстоянието между съответните активни страни на две секции, които са свързани последователно. Броят на колекторните пластини, разположени между пластините, към които се свързват началото и края на една секция, определя стъпката по колектора y_k . При простата листова намотка

$$(11.2)$$

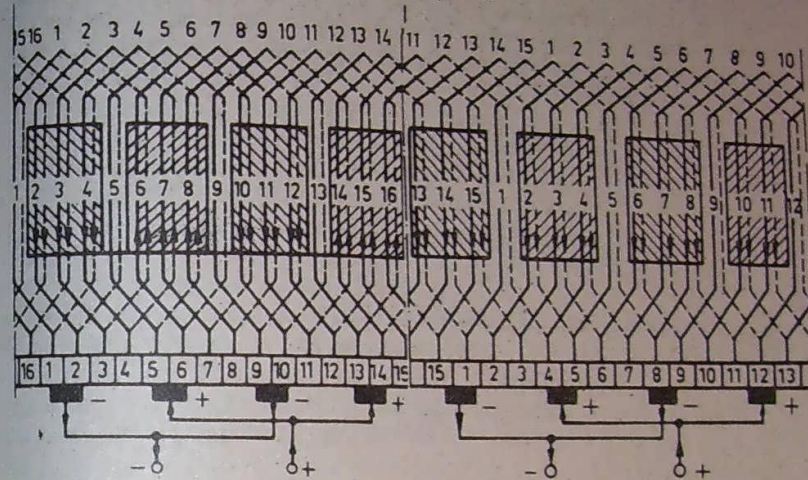
$$y = y_k = 1.$$

При простата вълнова намотка резултатната стъпка и стъпката по колектора се определят по формулата

$$(11.3)$$

$$y = y_k = \frac{K-1}{p}$$

На фиг. 11.4 е дадена разгънатата схема на проста листова намотка с данни: $S = K = 16$; $2p = 4$.



Фиг. 11.4. Схема на проста листова намотка със $S = K = 16$, $2p = 4$, $y = y_k = 1$

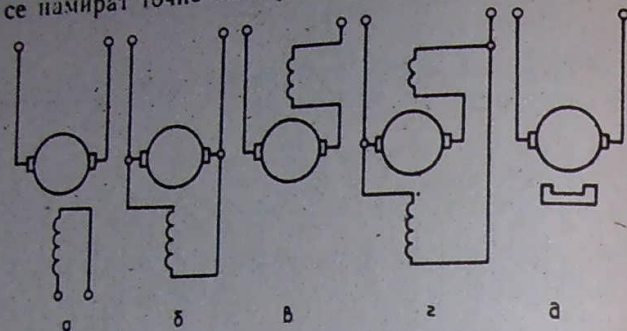
Фиг. 11.5. Схема на проста вълнова намотка със $S = K = 15$, $2p = 4$, $y = y_k = 7$

$$y_1 \approx \frac{S}{2p} = \frac{16}{4} = 4,$$

$$y = y_k = 1.$$

Секциите са означени с номерата на активните страни в горния слой (плътни линии). Колекторните пластини носят номерата на секцията, с началото на която са свързани. При построяването на схемата се започва от първа колекторна пластина, която се свързва със страната 1. След това, за да се очертае първата секция, страната 1 се свързва чрез челно съединение със страната 5, намираща се в долния край (прекъсната линия). Номерът и се получава, като към изходния номер се прибави стъпката y_1 ($1 + 4 = 5$). Двата края на първата секция са свързани към първа и втора колекторна пластина ($y_k = 1$). За да се получи номерът на секцията, която е свързана последователно с изходната, прибавяме към нея резултантната стъпка $y = 1$ ($1 + 1 = 2$). Последователно свързана със секция № 1 е секция № 2 и т. н. Краят на последната секция (№ 16) се свързва с началото на първата (№ 1).

Получава се затворена верига, свързана в многоъгълник. Четките са разположени така, че съединяват накъсо колекторните пластини на секциите с номера 1, 5, 9 и 13, чиито активни страни се намират точно между съседните полюси. Броят на четките е равен на броя на полюсите $2p$, а полярността им се редува. Едноименните четки са свързани помежду си и образуват положителния и отрицателния извод на котвата.



Фиг. 11.6. Видове възбудителни системи на машини за постоянен ток

Едноименните четки са свързани помежду си и образуват положителния и отрицателния извод на котвата.

На фиг. 11.5 е показана разгъната схема на проста вълнова намотка с данни: $S = K = 15$; $2p = 4$. Първата стъпка, изчислена по (11.1):

$$y_1 = \frac{15}{4} = 3,75,$$

се закръглява на най-близкото цяло число $y_1 = 4$. Резултатната стъпка и стъпката по колектора се определят по (11.3):

$$y = y_k = \frac{15-1}{2} = 7.$$

Първата секция има формата, показана на фиг. 11.3 б. Страните на секцията с номера 1 и 5 отстоят на разстояние y_1 помежду си. Началото на първата секция е свързано с първа колекторна пластина. Краят на секцията се свързва към колекторна пластина № 8. Този номер се получава, като към номера на изходната колекторна пластина се прибави стъпката по колектора $y_k (1+7=8)$. Номерът на секцията, свързана последователно с предходната, се определя, като към нейния номер се прибави резултатната стъпка (1+7=8). Следователно първата секция се свързва последователно с осмата, която лежи под следващата двойка полюси. По-нататък схемата се съставя по същия начин.

И тук четките са разположени по осите на полюсите. Едноименните четки и връзките между тях свързват на съсо секциите с номера 1, 5, 9 и 12. Активните страни на тези секции се намират в зоните между съседните полюси.

От анализа на прости листови и прости вълнови намотки с различен брой на секциите и на полюсите се установява следното. Формата на секциите при двата вида намотки е еднаква. Различен е начинът, по който се свързват изводите на секциите към колектора (вж. фиг. 11.3). Броят на паралелните клонове на двата вида намотки е различен. Простата вълнова намотка има винаги само два паралелни клона ($2a=2$). Броят на паралелните клонове на простата листова намотка е равен на броя на полюсите ($2a=2p$). При проектирането на постояннотоковите машини видът на котвената намотка се избира в зависимост от номиналния ток и номиналното напрежение, като се отчитат технико-икономически и технологични съображения и изисквания.

Свойствата на машините за постоянен ток (двигатели и генератори) се различават значително в зависимост от начина на свързване на веригите на котвената и възбудителната намотка.

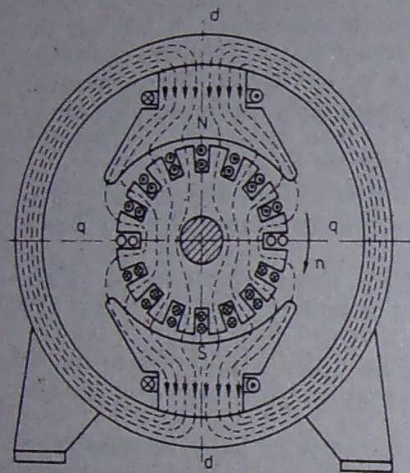
На фиг. 11.6 са представени различни системи за възбуждане, като котвената и възбудителната намотка са изобразени чрез възприетите в принципните схеми условни означения. Според начина на свързване машините за постоянен ток са следните:

1. С независимо възбуждане (фиг. 11.6 а). Котвената и възбудителната намотка са включени към два независими източника на постоянно напрежение.
2. С паралелно възбуждане (фиг. 11.6 б). Веригите на котвената и възбудителната намотка са включени паралелно към един и същи източник на напрежение.
3. С последователно възбуждане (фиг. 11.6 в). Веригите на котвената и възбудителната намотка са свързани последователно.
4. Със смесено възбуждане (фиг. 11.6 г). Върху полюсите са поставени две отделни възбудителни намотки. Едната се включва последователно, а другата — паралелно на котвената верига.
5. С възбуждане от постоянни магнити (фиг. 11.6 д). Полюсите са изработени от постоянни магнити, намагнитени преди или след монтирането им. Използват се лети, феритни или редкоземни магнити. В машините за постоянен ток с малка мощност се наблюдава значително повишаване на дела на конструкциите, при които магнитният поток се възбужда от постоянни магнити.

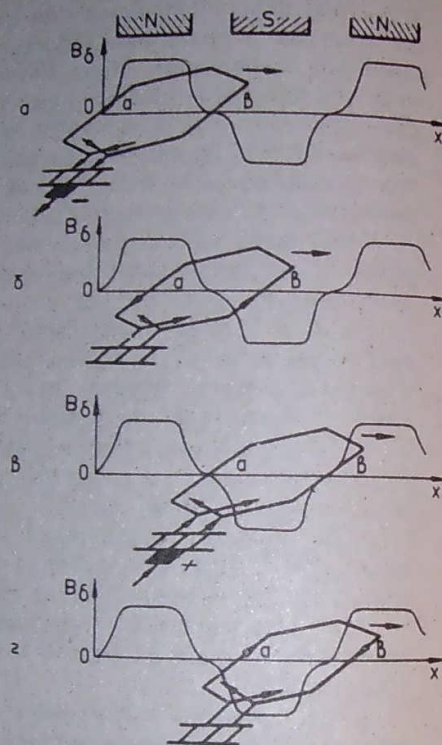
11.2. Принцип на действие. Уравнения

При машините за постоянен ток обикновено индукторът е в статора, а котвата — в ротора. Следователно постоянният магнитен поток, създаден от главните полюси, не променя положението си в пространството. Котвата се върти спрямо този неподвижен магнитен поток с честота на въртене n .

На фиг. 11.7 е показан напречен разрез на двуполусен ($2p=2$) постоянен ток двигател, на който с прекъснати линии са означени магнитните линии на потока, възбуден от главните полюси. Магнитната верига за този поток се състои от тялото и



Фиг. 11.7. Магнитно поле, възбудено от главните полюси на двигател за постоянен ток



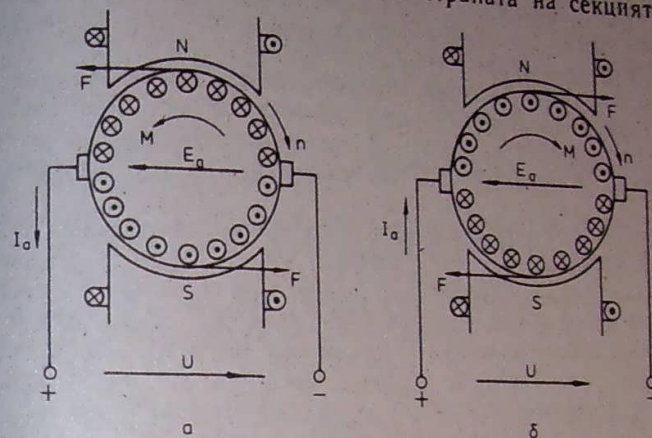
Фиг. 11.8. Различни положения на една секция на котвената намотка спрямо полюсите и четките

полюсите на статора, зъбите и ярема на котвения пакт и въздушната междина.

На същата фигура е означена посоката на тока в проводниците на котвената намотка. При малък ток в котвата, например при празен ход на двигателя, картината на магнитното поле практически не се променя. Тя е симетрична спрямо оста на полюсите d . Напречната ос q преминава точно по средата между два съседни полюса. Тя се нарича геометрична неутрална линия. Магнитната индукция във въздушната междина B_δ на полето на главните полюси е нула в геометричната неутрална линия.

На фиг. 11.7 се вижда, че токът във всички секционни страни, които се намират под даден полюс, има една и съща посока. Това

условие е задължително, за да се получат силите във всички проводници на котвата с еднакви посоки. В противен случай не е възможно да се осъществи електромеханичното преобразуване на енергията. При въртенето на котвата страната на секцията по-



Фиг. 11.9. Посока на с. д. н., тока, електромагнитната сила и електромагнитния момент в постоянен ток генератор (а) и двигател (б)

пада под полюс с обратна полярност след преминаването през геометричната неутрална линия — следователно тук трябва да се смени знакът на тока в нея. Промяната на посоката на тока в секциите на котвената намотка съобразно с положението им спрямо полюсите се извършва чрез колектора и четките. Тази промяна става с честота

$$(11.4)$$

$$f = p\omega$$

Процесът може да се изучи по-детайлно, като се разгледат няколко последователни положения на една и съща секция на котвената намотка спрямо полюсите и четките (фиг. 11.8). Приема се, че секцията е с диаметрална стъпка y_1 т. Кривата на магнитната индукция във въздушната междина $B_\delta(x)$ е представена във функцията от статорната координата x , насочена по периферията на междината. Тя запазва неизменно положението си при въртенето на котвата. Когато активните страни a и b на секцията се намират точно в геометричните неутрални линии (фиг. 11.8 а), в секцията не се индутира е. д. н., тъй като магнитната индукция е равна на нула. В същия момент токът в секцията е нула (вж. също секция № 1 на фиг. 11.4).

При следващото положение на секцията (фиг. 11.8 б) активните страни се намират под полюсите. Токът в секцията се затваря през веригата на съседните секции вляво и вдясно от разглежданата (сравни със секция № 3 от фиг. 11.4). Когато активните страни попаднат отново в геометричните неутрални линии (фиг.

(11.8 а), токът в секцията се анулира, а краищата ѝ са съединени нахъсо от положителната четка (вж. секция № 5 на фиг. 11.4). На фиг. 11.8 г секцията вече е преминала под следващата двойка полюси. Посоката на тока в секцията е обратна на тази от фиг. 11.8 б. Обаче посоката на тока в активните страни а и в съответствува на полярността на полюсите и на посоката на движение на секцията според правилото на лявата ръка.

Върху изложения дотук принцип почива електромеханичното преобразуване на енергията при машините за постоянен ток. Този процес се описва с помощта на уравнения, първото от които се получава от равновесието на напрежението и е. д. н. на котвената намотка.

На фиг. 11.9 а е представен схематично двуполусен генератор за постоянен ток. Котвата му се върти в показаната посока с честота на въртене n . В генератора се извършва преобразуване на механичната енергия в електрическа, следователно котвата трябва да се задвижва от механичен двигател. При зададената полярност на главните полюси посоката на индуктираното е. д. н. в котвената намотка се определя чрез правилото на дясната ръка. Ако външната верига е затворена с колектора и четките, протича ток I_a . Посоките на е. д. н. E_a и тока I_a в котвената намотка са еднакви. Токът I_a предизвиква пад на напрежение в съпротивлението на котвената намотка r_a , в което е включено и преходното контактно съпротивление между колектора и четките. Напрежението на изходите U ще бъде по-малко от индуктираното е. д. н.:

$$(11.5) \quad U = E_a - r_a I_a.$$

Посоката на силите F в проводниците на котвата се определя с помощта на правилото на лявата ръка. Тези сили образуват електромагнитния момент M . От фиг. 11.9 а се вижда, че електромагнитният момент на генератора M е насочен срещу посоката на въртене. Моментът на двигателя $M_{дв}$, който задвижва генератора, действа по посоката на въртене. Спрямо този момент електромагнитният момент е *съпротивителен*. При стационарна работа ($n = \text{const}$)

$$(11.6) \quad M = -M_{дв}.$$

На фиг. 11.9 б е представен схематично двигател за постоянен ток. Приема се, че посоката на въртене на котвата и полярността на полюсите са същите както при разглеждания генератор. Следователно посоката на индуктираното е. д. н. E_a ще бъде същата. Няма да се измени и поляритетът на напрежението U . Електромагнитният момент на двигателя M е насочен по посоката на въртене. Същата трябва да бъде посоката на електромагнитната сила F . Поради това според правилото на лявата ръка токът в котвената намотка I_a трябва да има обратна посока на посоката в генератора. Е. д. н. E_a и токът I_a в проводни-

ците на котвата са *противопосочни*. Приложеното напрежение U се уравновесява от е. д. н. E_a и пада в съпротивлението:

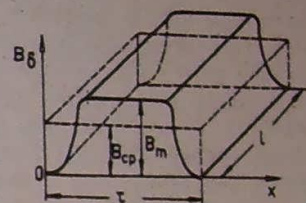
$$(11.7) \quad U = E_a + r_a I_a.$$

При стационарна работа електромагнитният момент на двигателя M е равен и *противопосочен* на съпротивителния момент M_c на работния механизъм, задвижван от двигателя:

$$(11.8) \quad M = M_c.$$

Сравнението на (11.5) и (11.7) показва, че в генератора $U < E_a$, а в двигателя $U > E_a$.

С помощта на фиг. 11.9 могат да бъдат направени следните изводи. Поляритетът на котвата на постояннотоковия генератор се променя при промяна на посоката на въртене или на посоката на тока във възбудителната намотка. Посоката на въртене на постояннотоковия двигател може да се промени чрез смяна на поляритета на котвеното напрежение или чрез обръщане на посоката на тока във възбудителната намотка.



Фиг. 11.10. Разпределение на магнитната индукция във въздушната междина за един полюс

Електродвижещо напрежение в котвената намотка и електромагнитен момент. Пакетът на котвата и полюсите имат еднаква дължина l . Същата е дължината и на активните

части на секциите, положени в каналите на котвата. С достатъчна точност може да се приеме, че магнитното поле във въздушната междина по дължината l е плоскопаралелно.

Разпределението на магнитната индукция във въздушната междина за един полюс е показано на фиг. 11.10. Полюсното деление, изразено чрез диаметъра на котвата D , е

$$(11.9) \quad \tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

Магнитният поток във въздушната междина за едно полюсно деление е

$$(11.10) \quad \Phi = \int_S B_s ds = l \int_0^\tau B_s(x) dx.$$

Потокът може да се изрази чрез средната стойност на магнитната индукция във въздушната междина:

$$(11.11) \quad \Phi = l \tau B_{cp}.$$

Проводниците на котвената намотка се движат със скорост v в магнитното поле на полюсите:

(11.12) $v = \pi D n = 2\pi n l$.
Е. д. н., индутирано в един проводник, се определя от (7.1):
 $E_1 = B_{cp} l v$.

От всичко изложено дотук, може да се направи изводът, че постояннотоковата машина е постояннотокова само за външната верига. Вътре „в себе си“ тя е синхронна машина, тъй като токът в котвата е променлив с честота $f = pn$. Броят на фазите на котвената намотка m е равен на броя на секциите S , респ. на броя на колекторните пластини K . Освен това K -фазната котвена намотка е свързана в многогълник (K -гълник). Колекторът заедно с четките изпълнява при генераторите функцията на механичен ток изправител, който преобразува променливия ток на котвата в постоянен за външната верига (товара). При двигателите колекторно-четковият апарат изпълнява ролята на механичен инвертор, преобразуващ постоянния ток от захранващия източник в променлив ток в котвената намотка. В конструктивно отношение постояннотоковата машина представлява обрната синхронна машина — котвата е в ротора, а индукторът — в статора.

Средната стойност на това е. д. н. е

$$(11.13) \quad E_{cp} = l v B_{cp} = 2pn l \tau B_{cp} = 2pn \Phi.$$

Котвената намотка на постояннотоковите машини се състои от N проводника и има $2a$ паралелни клона. Във всеки паралелен клон са свързани последователно $\frac{N}{2a}$ проводници. Е. д. н. на всички проводници, които образуват един паралелен клон, се събират алгебрично. Е. д. н. на паралелния клон е равно на е. д. н. на котвената намотка.

$$(11.14) \quad E_a = \frac{N}{2a} E_{cp} = pn \frac{N}{a} \Phi.$$

Тази зависимост може да се изведе и от общата теория на машините за променлив ток (гл. 6) чрез индутираното е. д. н. (уравн. 6.37), ако в него се замести $f = pn$ от (11.4), $\omega = \frac{N}{4a}$, $k_w = 1$ и 4 вместо $\sqrt{2}l = 4,44$, тъй като токът във външната верига не е променлив, а постоянен.

За дадена машина величината

$$c_E = \frac{pN}{a}$$

е постоянна. Тогава

$$(11.15) \quad E_a = c_E n \Phi.$$

Последната зависимост показва, че е. д. н. E_a в котвената намотка е пропорционално на честотата на въртене и на основния магнитен поток.

Предишното разглеждане показва, че електромагнитният момент се образува от взаимодействието на тока в проводниците на котвената намотка и магнитното поле във въздушната междина. Електромагнитният момент може да се изрази чрез електромагнитната мощност P_d и ъгловата скорост Ω с помощта на известната зависимост

$$(11.16) \quad M = \frac{P_d}{\Omega}.$$

Тъй като $P_d = E_a I_a$ и като се замести E_a от (11.14), се получава

$$(11.17) \quad M = \frac{E_a I_a}{2\pi n} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_a \Phi$$

$$(11.18) \quad M = c_M I_a \Phi.$$

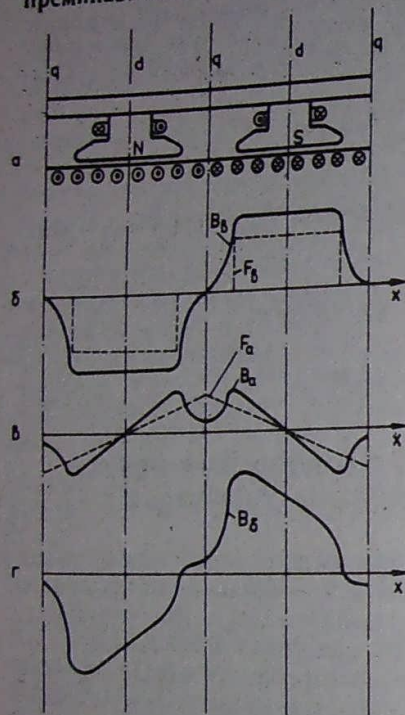
11.3. Магнитно поле при натоварване. Комутация

При направените дотук изводи беше прието, че токът в котвата е малък и не предизвиква промяна в магнитното поле, възбудено от главните полюси. При натоварване на машините за постоянен ток магнитното поле, създадено от тока в котвата, не може да се пренебрегне. То оказва влияние върху процесите в машината и преди всичко върху комутацията. Магнитното поле на тока в котвата се нарича *реакция на котвата*.

На фиг. 11.11 а е показан в разгънат вид двигателят за постоянен ток от фиг. 11.7. На фиг. 11.11 б с прекъсната линия е начертано м. д. н. на възбудителната намотка F_w и с пълна линия — магнитната индукция във въздушната междина B_w на полето на главните полюси. Вижда се, че кривата на индукцията е симетрична спрямо оста на полюсите d и има стойност нула в геометричните неутрални линии q . Такова е магнитното поле при празен ход на двигателя.

М. д. н. на тока в котвата F_a е линейна функция на x (фиг. 11.11 в). Тъй като четките са разположени в геометричните неутрални линии q , м. д. н. е насочено в пространството по същите оси и има максимална стойност. Посоката му по осите d се определя с помощта на правилото на десния винт, приложено за означените посоки на токовете в котвената намотка. По осите d на полюсите м. д. н. F_a се анулира.

При въртенето на котвата магнитното поле на реакцията на котвата остава неподвижно спрямо полюсите. Това се дължи на факта, че посоката на тока в проводниците на котвата се сменя след преминаването им през геометричните неутрални линии. Максималната стойност на F_a е пропорционална на тока в котвата I_a . Затова тя се променя при изменение на натоварването на машината.



Фиг. 11.11. Магнитно поле във въздушната междина при наличие на реакция на котвата

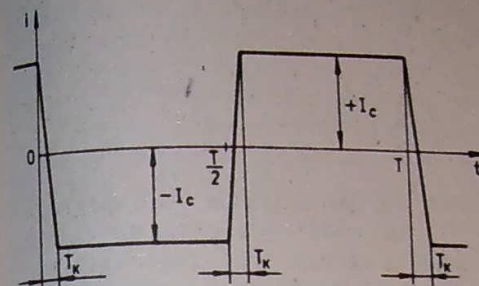
Когато магнитната верига на машината е ненаситена, кривата на магнитната индукция $B_a(x)$ на резултатното поле може да бъде получена чрез сумиране на кривите $B_b(x)$ и $B_a(x)$ — фиг. 11.11 г. Тази крива има същата средна стойност B_{cp} както при празен ход. При наситена магнитна верига средната стойност на магнитната индукция и потокът при натоварване са по-малки от тези при празен ход. В този случай реакцията на котвата има размагнитващо действие.

Изследването на магнитното поле във въздушната междина показва, че при натоварване магнитната индукция B_a се разпределя неравномерно спрямо оста на полюсите. В единия край на полюсите се получава увеличение, а в другия край — намаление на индукцията в сравнение с тази при празен ход. В геометричната неутрална линия магнитната индукция е отлична от нула поради реакцията на котвата (фиг. 11.11 г). Следователно в секциите, дадени накъсо от четките, ще се индуцира е. д. н. при преминаването на активните им страни през геометричната неутрална линия.

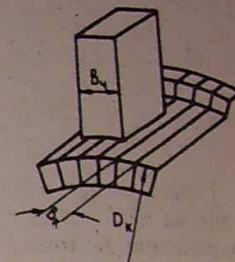
Разпределението на магнитната индукция на реакцията на котвата $B_a(x)$ не повтаря формата на зависимостта $F_a(x)$. Причина за това е увеличената стойност на въздушната междина в пространството между полюсите. В тази зона магнитната проводимост е много по-малка от магнитната проводимост под полюсите. В резултат в кривата $B_a(x)$ се появяват характерни седловини, които намаляват стойностите на B_a по осите q , въпреки че там F_a има максимална стойност (фиг. 11.11 в).

Двете магнитни полета (на главните полюси и реакцията на котвата) се наслагват и образуват резултатно магнитно поле във въздушната междина при натоварване.

Фиг. 11.12. Изменение на тока в секциите при въртене на котвата



Фиг. 11.12. Изменение на тока в секциите при въртене на котвата



Фиг. 11.12. Определяне на периода на комутацията

Описаните явления оказват влияние върху комутацията на машината.

Комутация. От принципа на действие на машините за постоянен ток следва, че електромеханичното преобразуване е възможно само ако посоката на тока в секциите се променя периодически при въртенето на котвата. Този процес се осъществява с колектора и четките и се нарича комутация.

При достигане на неутралната линия секциите последователно се свързват накъсо чрез колекторните пластини и четките. Времето T_k , през което една секция е съединена накъсо от четките, се нарича период на комутация. За периода на комутацията токът в секцията трябва да се измени от $+I_c$ до $-I_c$ или обратно (фиг. 11.12), където

$$(11.19) \quad I_c = \frac{I_a}{2a}.$$

Фигура 11.12 показва, че докато активните страни на секцията са под полюсите, токът в секцията е постоянен. При преминаване на страните през неутралните зони токът в секцията е променлив. Смяната на посоката на тока в секцията се извършва за много късо време.

При въртене на колектора със скорост v_k колекторната пластинна изминава за време T_k път, равен на широчината на четката b_a , откъдето

$$(11.20) \quad T_k = \frac{b_a}{v_k}.$$

За проста листова намотка ($y_k = 1$), като се има предвид, че $b_k = \frac{\pi D_k}{K}$ и $v_k = \pi D_k n$ (фиг. 11.13), от (11.20) се получава

$$T_k = \frac{\beta_k}{Kn}, \quad (11.21)$$

където

$$\beta_k = \frac{b_n}{b_k} > 1.$$

Процесът на комутация зависи от много голям брой фактори и затова не е възможно да се получи достатъчно точно аналитично решение за тока в комутиращата секция. Изследванията показват, че токът на късо съединение в затворената от четката секция се определя от индуктираните в нея е. д. н. Σe .

Ако $\Sigma e = 0$, токът на късо съединение в комутиращата секция е нула. Тогава токът в секцията се изменя линейно от времето през периода на комутация. Такава комутация се нарича праволинейна.

В общ случай $\Sigma e \neq 0$, тъй като в комутиращата секция се индуктират е. д. н. на собствена и взаимна индукция, както и е. д. н. на въртене от външните полета в неутралната зона. На фиг. 11.14 са представени три от комутиращите секции на намотката от фиг. 11.4. В секция 5 ще се индуктира е. д. н. на самоиндукция

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Активните страни на секция 5 и на комутиращите едновременно с нея секции 1 и 9 са разположени в едни и същи канали. Затова в секция 5 се индуктира е. д. н. на взаимна индукция

$$e_M = -2M \frac{di}{dt}.$$

Сумата от двете е. д. н.

(11.22)

$$e_r = e_L + e_M$$

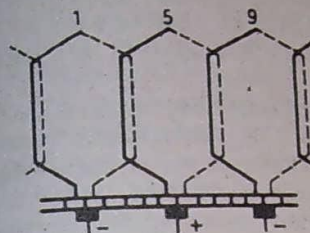
се нарича реактивно е. д. н. в комутиращата секция. Съгласно закона на Ленц е. д. н. е насочено така, че се противопоставя на изменението на тока, т. е. забавя неговото изменение.

Ако се приеме, че комутацията на всички секции е праволинейна, средната стойност на производната на тока е

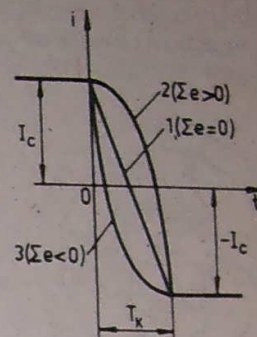
$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{cp} = -\frac{2I_c}{T_k}.$$

Тогава средната стойност на реактивното е. д. н. за периода на комутация е

$$e_{rp} = -(L + 2M) \frac{2I_c}{T_k}. \quad (11.23)$$



Фиг. 11.14. Индуктиране на е. д. н. на самоиндукция и взаимна индукция в комутиращата секция



Фиг. 11.15. Праволинейна (1), забавена (2) и ускорена (3) комутация

Последното уравнение показва, че реактивното е. д. н. е пропорционално на коефициентите на собствена и взаимна индуктивност на тока в котвата — вж. (11.19), т. е. на степента на натоварване на машината, и обратнопропорционално на периода на комутация.

От фиг. 11.11 г следва, че при натоварване вследствие на реакцията на котвата магнитното поле в неутралните линии има индукция B , отлична от нула. При преминаване на активните страни през неутралните линии в комутиращата секция се индуктира е. д. н., чиято големина съгласно (7.1) е

$$e_{aq} = 2\omega_c v l B_{aq}, \quad (11.24)$$

където ω_c е броят на навивките в секцията.

Е. д. н. от полето на реакцията на котвата e_{aq} е съпосочно с реактивното е. д. н. e_r , следователно то също забавя комутацията.

От казаното дотук следва, че под действие на e_r и e_{aq} се забавя изменението на тока в комутиращата секция. Това предизвиква искрене между четките и колектора и колектора и влошава работата на плъзгащия контакт. Налага се в секцията да се индуктира допълнително е. д. н. e_k , което да е насочено срещу $e_r + e_{aq}$, за да ги компенсира. За целта е необходимо в зоната на комутацията да се създаде външно магнитно поле с индукция

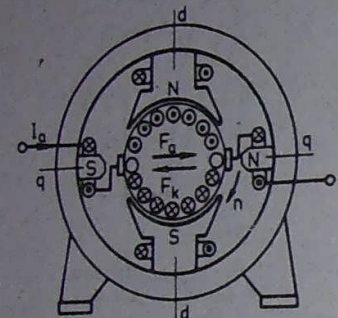
B_k , така че e_k да бъде отрицателно спрямо e_r и e_{aq} . Големината на комутиращото е. д. н. е

$$e_k = 2\omega_c v l B_k. \quad (11.25)$$

Сумариото е. д. н. в комутиращата секция е

$$\Sigma e = e_r + e_{aq} - e_k. \quad (11.25)$$

То определя закона на изменение на тока и вида на комутиращата (фиг. 11.15). При $\Sigma e = 0$ се получава праволинейна комутация. Когато $(e_r + e_{aq}) > e_k$, комутацията е забавена, а когато $e_k > (e_r + e_{aq})$ — тя е ускорена.



Фиг. 11.16. Разположение и полярност на допълнителните полюси в двигател за постоянен ток

Забавената комутация е неблагоприятна за нормалната работа на машината и колекторно-четковия апарат. Обратно, леко ускорената комутация не се съпровожда от искрене между колектора и четките. Оттук следва, че в активните страни на комутиращата секция трябва да се индукира е. д. н. e_k , което да компенсира e_r и e_{aq} .

Съвременните машини за постоянен ток със средна и голяма мощност са снабдени с допълнителни полюси за подобряване на комутацията. Те възбуждат магнитно поле, което индукира в комутиращите секции е. д. н. e_k . Затова допълнителните полюси са разположени в геометричните неутрални линии q (фиг. 11.16). Полярността им се определя по такъв начин, че м. д. н. F_k на допълнителните полюси да бъде насочено срещу м. д. н. на реакцията на котвата F_a . Посока на тези м. д. н. се определя с помощта на правилото на десния винт.

Реактивното е. д. н. e_r и е. д. н. от реакцията на котвата e_{aq} са пропорционални на котвения ток I_a и на честотата на въртене на котвата n . За да се получи компенсация чрез е. д. н. e_k , индукирано от полето на допълнителните полюси, трябва да се изпълнят две условия. Първото условие е: м. д. н. F_k да бъде пропорционално на тока I_a , т. е. намотките на допълнителните полюси да бъдат свързани последователно с котвената намотка (фиг. 11.16). Второто условие е: индукцията във въздушната междина под допълнителните полюси B_k да бъде пропорционална на I_a , т. е. магнитната верига на допълнителните полюси да бъде ненаситена. При изпълнение на тези условия се получава автоматична компенсация между $e_r + e_{aq}$, от една страна, и e_k — от друга, за различни режими на

работа (при различни стойности на тока в котвата I_a и честотата на въртене n).

Всички направени досега разглеждания се отнасят за положение на четките, при което секциите комутират, когато активните страни преминават през неутралните линии. Това е задължително за машините с допълнителни полюси и за двигателите, при които се променя посоката на въртене (реверсивните двигатели).

Искренето между колектора и четките се дължи на електромагнитни и механични причини. Първите са свързани с комутиационния процес. Когато колекторните пластини излизат изпод четките, електрическата верига се прекъсва и възникват краткотрайни електрически дъги. Искренето по механични причини се дължи на нарушаването на контакта между колектора и четките. То се предизвиква от елиптичност на колектора, от биене на работната му повърхност, от радиално изместване на отделни колекторни пластини, от недостатъчна контактна сила, с която четките са притиснати към колектора, и др. На практика при продължителна работа на постояннотоковите машини се допуска само слабо искрене под четките. Силното искрене постепенно разрушава повърхностите на колектора и четките. Следователно качеството на комутиацията в значителна степен определя надеждността на машините в експлоатация.

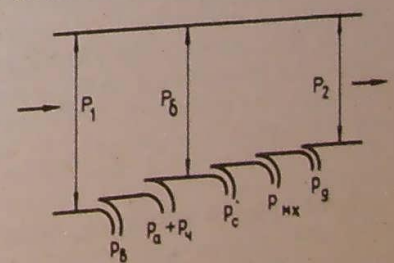
Искренето е източник на радиосмущения. Тяхното ниво се намалява чрез филтри. Между изводите с различна полярност и тялото на машината се включват подходящи кондензатори. Те шунтират високочестотните колебания, които се получават при комутиацията.

11.4. Общи сведения за постояннотоковите двигатели

Преобразуването на електрическата енергия в механична от двигателите за постоянен ток както при дру-

гите типове електродвигатели е съпроводено със загуби на мощност. Енергийният баланс е изобразен чрез диаграмата на фиг. 11.17. Механичната мощност на вала на двигателя P_2 се получава, като от консумираната от мрежата електрическа мощност P_1 се извадят общите загуби Σp :

$$(11.27) \quad P_2 = P_1 - \Sigma p.$$



Фиг. 11.17. Диаграма на мощностите и загубите на двигател с паралелно възбуждане

Общите загуби в двигателя са

$$(11.28) \quad \Sigma p = p_a + p_{\alpha} + p_{\chi} + p_c + p_{\text{мех}} + p_d,$$

където $p_a, r_a I_a^2$ са електрическите загуби в котвената верига;
 $p_{\alpha}, r_{\alpha} I_{\alpha}^2$ — електрическите загуби във възбудителната намотка;

$p_{\chi}, 2\Delta U_{\chi} I_a$ — електрическите загуби в контакта между колектора и четките;

p_c — загубите в стоманата на котвата;

$p_{\text{мех}}$ — механичните загуби от триене в лагерите и вентилация;

p_d — допълнителните загуби;

r_a — съпротивлението на всички намотки, свързани последователно в котвената верига;

r_{α} — съпротивлението на възбудителната намотка;

ΔU_{χ} — падът на напрежението в една четка.

К. п. д. на двигателя се изчислява по формулата

$$(11.29) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1},$$

където $P_1 = UI$ е мощността, която двигателят получава от мрежата.

Двигателите за постоянен ток имат относително голям к. п. д. Например двигател с номинална честота на въртене 1500 min^{-1} и номинална мощност 200 kW има к. п. д. 92%, а двигател с номинална мощност 11 kW и същата честота на въртене — 84%.

Начинът на възбуждане на постояннотоковите двигатели оказва съществено влияние върху техните свойства, област на приложение и методи за регулиране. Това е свързано с разликата в механичните характеристики $n = f(M)$ при двигателите с независимо, паралелно, последователно и смесено възбуждане. Уравнението на механичната характеристика се получава от уравнението на двигателя (11.7), (11.15) и (11.18):

$$U = E_a + r_a I_a;$$

$$E_a = c_E n \Phi;$$

$$M = c_M I_a \Phi.$$

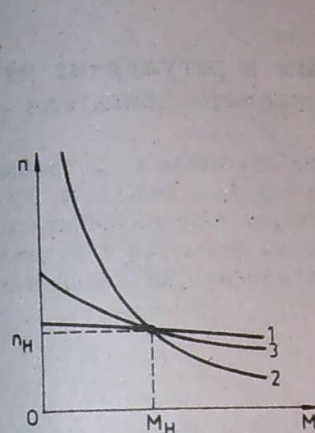
След като се замести E_a от второто уравнение в първото, се получава

$$(11.30) \quad n = \frac{U - r_a I_a}{c_E \Phi}.$$

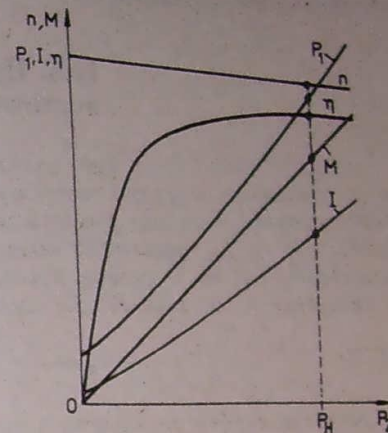
От третото уравнение се изразява I_a и се замества в (11.30), откъдето

$$(11.31)$$

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a M}{c_E c_M \Phi^2}.$$



Фиг. 11.18. Механични характеристики на двигатели с паралелно (1), последователно (2) и смесено възбуждане при съпосочно свързване (3)



Фиг. 11.19. Работни характеристики на двигател с паралелно възбуждане

Уравнение (11.31) дава възможност да се изследва механичната характеристика $n = f(M)$ на двигатели с различен вид на възбуждане и различен начин за регулиране на честотата на въртене.

При $U = U_n = \text{const}$ от (11.31) се получава естествената механична характеристика. На фиг. 11.18 са сравнени естествените механични характеристики на двигатели с паралелно, последователно и смесено възбуждане. Механичната характеристика на двигателя с независимо и паралелно възбуждане е твърда — честотата на въртене се намалява малко при увеличаване на товарването. Двигателят с последователно възбуждане има механична характеристика, подходяща за транспортни средства, тъй като с намаляване на честотата на въртене n двигателят посочно свързване на възбудителните намотки има междинни свойства, които зависят от пресобладаващото действие на паралелната или последователната възбудителна намотка.

Работните свойства на двигателите за постоянен ток се определят и от работните характеристики. Работните характеристики представляват зависимостите на честотата на въртене n , момента

M , входящата мощност P_1 , тока I и к. п. д. η от полезната мощност P_2 на вала на двигателя. На фиг. 11.19 са представени работните характеристики на двигател с паралелно възбуждане. Вижда се, че техният вид е подобен на работните характеристики на асинхронния двигател.

11.5. Пускане и регулиране на постояннотоковите двигатели

При пускане на двигателите не трябва да се получи недопустимо голям пусков ток $I_{ап}$, опасен за котвената намотка и колекторно-четковия апарат. Ограничения за стойностите на $I_{ап}$ зависят от мощността на двигателя и от продължителността на пусковия процес. В момента на включване на двигателя $n = 0$ и от (11.30) следва

$$(11.32) \quad I_{ап} = \frac{U}{r_a}$$

Съпротивлението на котвената верига r_a е малко при двигателите със средна и голяма мощност. Тези двигатели могат да се пуснат или чрез захранване с по-ниско напрежение $U < U_n$, или чрез включване на допълнителен регулируем резистор R_p във веригата на котвата. Тогава

$$(11.33) \quad I_{ап} = \frac{U}{r_a + R_p}$$

С увеличаване скоростта на ротора честотата на въртене n и е. д. н. E_a нарастват, I_a намалява и е необходимо R_p да се намали постепенно, докато се изключи изцяло.

Директно пускане ($R_p = 0$) се прилага само при двигателите с мощност до няколко киловата, за които $I_{ап} = (4-6)I_{ан}$. При двигатели със средна мощност е необходимо да се ограничи пусковият ток до $I_{ап} = (1.5-2)I_{ан}$. При голяма мощност пусковият ток не трябва да надвишава номиналния ток в котвата $I_{ан}$.

Стойността на пусковия момент M_n се определя от (11.31) за $n=0$:

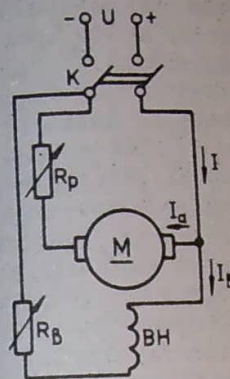
$$(11.34) \quad M_n = \frac{c_M U \Phi}{r_a + R_p} = c_M I_{ап} \Phi$$

При зададен пусков ток пусковият момент е максимален, когато магнитният поток на възбудителната намотка е максимален, т. е. когато токът в нея е най-голям.

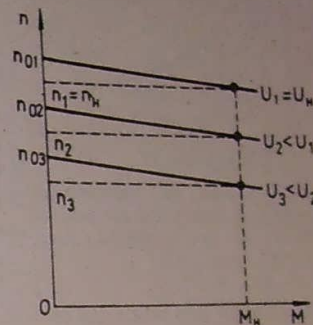
На фиг. 11.20 е дадена схемата на постояннотоков двигател с паралелно възбуждане. От казаното дотук следва,

че при включване на двигателя към мрежата резисторът R_p трябва да има максимално съпротивление, а резисторът R_B — минимално.

Уравнението на механичната характеристика (11.31) може да се запише в един и същи вид за двигателите с независимо и паралелно възбуждане и за двигателите с възбуждане от постоянни магнити:



Фиг. 11.20. Схемата на свързване на двигателя с паралелно възбуждане



Фиг. 11.21. Механични характеристики на двигатели с паралелно или независимо възбуждане, получени при различно напрежение на котвата

паралелно възбуждане и за двигателите с възбуждане от постоянни магнити:

$$(11.35) \quad n = n_0 - kM,$$

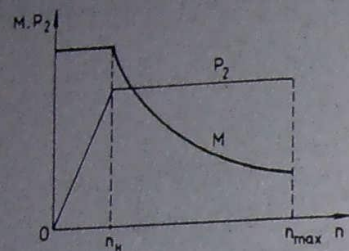
където

$$(11.36) \quad n_0 = \frac{U}{c_E \Phi};$$

$$k = \frac{r_a}{c_E c_M \Phi^2}$$

Ако $U = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$, (11.35) е уравнение на права линия. При празен ход на двигателя ($M = 0$) честотата на въртене е n_0 . Номиналната честота на въртене n_n е малко по-малка от n_0 . При различни напрежения се получават различни стойности на честотите на въртене при празен ход и натоварване. На фиг. 11.21 са показани механичните характеристики на един двигател, чиято котва е захранена с различни напрежения.

Това е семейство прави линии, успоредни на естествената характеристика U_1, U_n . По такъв начин чрез регулиране на напрежението на котвата се регулира без загуби на енергия честотата на въртене в посока на намаление по отношение на номиналната (т. нар. котвено управление).



Фиг. 11.22. Закони при регулиране на честотата на въртене в две зони — първа зона $M = \text{const}$, втора зона $P_2 = \text{const}$

Вид регулиране не може да се реализира при двигателите с възбуждане с постоянни магнити.

Голям брой различни работни машини и съответните регулируеми електроздвижвания изискват показаните на фиг. 11.22 закони на регулиране. Честотата на въртене се изменя в две зони, които съответствуват на разгледаните по-горе методи. В първата зона при $n \leq n_n$ регулирането е при $M = \text{const}$. То става чрез изменение на напрежението на котвата и постоянен възбудителен ток $I_n, I_{вн} = \text{const}$. В тази зона мощността е линейна функция на честотата на въртене.

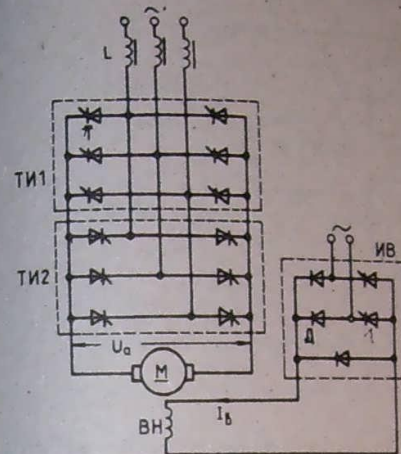
Във втората зона $n \geq n_n$ мощността е постоянна ($P_2 = \text{const}$). При това условие моментът

$$M = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n}$$

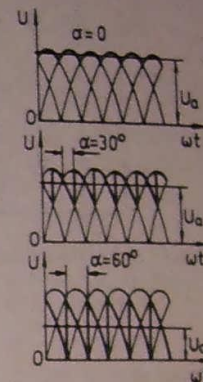
се изменя по хипербола в зависимост от n . В тази зона котвеното напрежение остава постоянно, а честотата на въртене се повишава чрез намаляване на възбудителния ток. В цялата зона токът в котвата има приблизително постоянна стойност. Като се отчете, че $M \propto I_a(\Phi)$, получава се изменение на потока в зависимост от честотата също по хиперболичен закон.

Описаните закони за регулиране се реализират, като постояннотоковите двигатели се управляват от различни електронни устройства с полупроводникови прибори. Принципно схема на такова устройство за регулиране на двигател с независимо възбуждане е представена на фиг. 11.23. Котвата е захранена от два трифазни управляеми тиристорни изправителя $ТИ1$ и $ТИ2$, свързани настречно. Системата за управление не разрешава едновременно

работата на двата изправителя. Наличието им позволява да се реверсира двигателят чрез промяна на поляритета на напрежението U_a . Когато не е необходимо реверсиране на двигателя, схемата съдържа само един токоизправител.



Фиг. 11.23. Реверсивна схема с управляеми тиристорни изправители за регулиране на двигател с независимо възбуждане



Фиг. 11.24. Регулиране на напрежението на котвата чрез изменение на ъгъла на отпушване на тиристорите

Тиристорните изправители са с естествена комутация и импулсно фазово управление. Напрежението на котвата U_a се регулира чрез изменение на ъгъла на отпушване на тиристорите (фиг. 11.24). Средната стойност на изправеното напрежение е

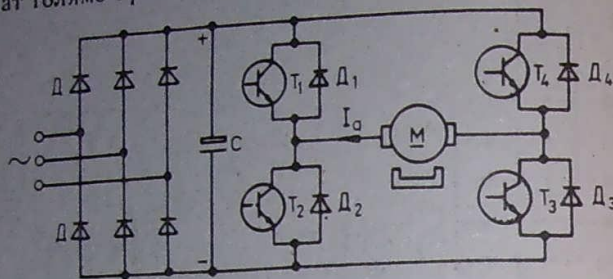
$$(11.37) \quad U_a = U_m \cos \alpha,$$

където U_m е изходящото напрежение при ъгъл на отпушване $\alpha = 0$. Пулсациите на напрежението предизвикват пулсации на тока. За да се намалят пулсациите на тока, последователно на котвата може да бъде включен дросел.

При $\alpha = 90^\circ$ се получава $U_a = 0$, а при $\alpha > 90^\circ$ изправителят работи като инвертор. Тогава двигателят преминава в режим на генераторно спиране и отдава електрическа енергия в мрежата. Следователно машината може да работи в двете посоки на въртене като двигател или генератор. За такова задвижване се казва, че осъществява работа в четири квадранта на характеристиката $M = f(n)$.

Регулирането на честотата на въртене в първата зона става при $I_a = \text{const}$. Във втората зона е необходимо да се регулира

възбудителният ток при постоянна стойност на напрежението U_a . Това става чрез изправителя ИВ, който захранва възбудителната намотка на двигателя. Той е еднофазен, полууправляем. Системите управляем изправител—постояннотоков двигател намират голямо приложение в регулируемите задвижвания. Те се



Фиг. 11.25. Реверсивна схема на транзисторен преобразувател за широчинно-импулсно регулиране на двигател с възбуждане от постоянни магнити

характеризират с добър к. п. д., отлични динамични свойства: широк обхват на регулиране на честотата на въртене, относително малка стойност. Задвижванията с по-високи изисквания се изпълняват с обратни връзки по честота на въртене и по ток в котвата. Недостатък е наличието на пулсации в изправеното напрежение, което води до пулсации на тока и влошаване на комутацията.

На фиг. 11.25 е показана принципната схема на транзисторен преобразувател за регулиране на честотата на въртене на двигател за постоянен ток с възбуждане от постоянни магнити. Котвената верига е свързана в диагонала на мостова схема, състояща се от четири транзисторни ключа (T_1 до T_4). Транзисторният преобразувател се захранва от трифазен неуправляем изправител с изглаждащ кондензатор.

На фиг. 11.26 са представени време-диаграмите за управление на транзисторните ключове, напрежението и тока в котвата на двигателя. Напрежението U_a се регулира по метода на широчинно-импулсна модулация (ШИМ). На изводите на котвата се подават периодично правоъгълни импулси. Модулационната честота $f_m = 1,5 \text{ kHz}$ е постоянна, което отговаря на постоянен период

$$(11.38)$$

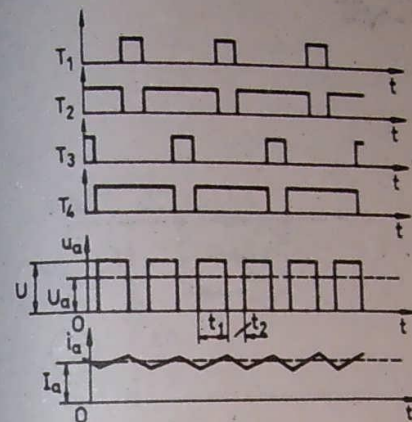
$$T = t_1 + t_2$$

Времената t_1 и t_2 са съответно продължителността на импулса и паузата. Средната стойност на напрежението се променя чрез изменение на широчината на импулса t_1 , като се регулира про-

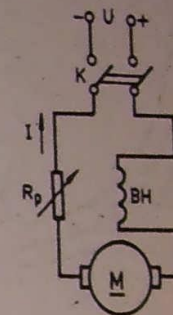
дължителността на отпушване на двойката транзистори. Коефициентът на запълване

$$(11.39)$$

$$\gamma = \frac{t_1}{T} = \frac{U_a}{U}$$



Фиг. 11.26. Време-диаграми за управление на транзисторите, напрежение и ток в котвата при схемата от фиг. 11.25



Фиг. 11.27. Схема на свързване на двигател с последователно възбуждане

може да се изменя плавно от 0 до 1 и да се регулира честотата на въртене.

Системата от фиг. 11.25 дава възможност да се реверсира двигателят чрез смяна на двойката транзистори (T_1, T_3 или T_2, T_4), които подават напрежение на котвата. Следователно двигателят работи в два квадранта на характеристиката $M = f(n)$.

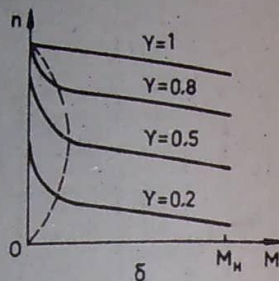
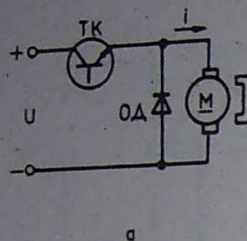
Разгледаните две системи се прилагат за главни и подавателни задвижвания на металорежещи машини с цифрово-програмно управление, за задвижване на промишлени роботи и манипулатори и за други задвижвания. Управлението е аналогово, цифрово или смесено. Най-новите системи са с микропроцесорно управление.

В постояннотоковите двигатели с последователно възбуждане токът в котвената и възбудителната намотка е един и същи (фиг. 11.27). Ако се пренебрегне насищането на магнитната верига, следва, че магнитният поток Φ е пропорционален на м. д. н. на възбудителната намотка и следователно на тока в котвата:

$$(11.40)$$

$$\Phi = a I_a$$

на работния и спомагателния тиристор, се получава периодично отпущане и запущане на главния тиристор T_1 . Така двигателят се включва за време t_1 към напрежението на батерията (фиг. 11.30). През време на импулса токът в двигателя е i_1 . През време

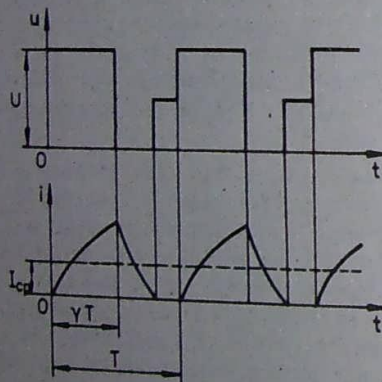


Фиг. 11.31 Схема на свързване (а) и механични характеристики (б) на двигател с възбуждане от постоянен магнит при импулсно регулиране

на паузата токът в двигателя не се прекъсва. Под действие на запасената електромагнитна енергия в индуктивностите на котвената и възбудителната намотка през паузата токът е i_2 . Веригата на този ток се затваря през обратния диод OD .

Регулирането на средното напрежение, съответно на средния ток и честотата на въртене, става чрез изменение на коефициента на запълване

$$\gamma = \frac{t_1}{T}$$



Фиг. 11.32 Режим с прекъсване на тока при импулсно регулиране

Това се постига или чрез изменение на t_1 при $T = \text{const}$ (ШИМ), или чрез изменение на T при $t_1 = \text{const}$. Използва се и комбинирано управление. Периодът $T = 1/f_m$ се изменя чрез регулиране на модулационната честота обикновено в граници от 10 Hz до 200—600 Hz.

Механичните характеристики при различни γ имат същия вид като показаните на фиг. 11.28. Посоката на въртене на двигателя се сменя чрез промяна на посоката на тока във възбудителната намотка.

Широчинно-импулсната модулация се използва също така

за регулиране на честотата на въртене на постояннотокови двигатели с малка мощност и възбуждане от постоянни магнити. В този случай вместо тиристорен регулатор във веригата на котвата се свързва транзисторен ключ TK (фиг. 11.31 а). При по-големи напрежението и тока в котвата е подобен на показания на фиг. 11.30. При по-малко натоварване и ниска модулационна честота (по-голям период T) токът в края на паузата може да се анулира (фиг. 11.32). Получава се режим с прекъсване на тока. Той се характеризира с по-големи пулсации на тока и увеличаване на загубите в двигателя.

На фиг. 11.31 б са представени механичните характеристики на двигателя при различни стойности на γ . С прекъснатата линия е означена областта, при която се получава режим на прекъснат ток. Тази област се намалява, като се увеличи модулационната честота, което обаче предизвиква увеличаване на загубите в транзисторния ключ и в двигателя.

11.6. Постояннотокови генератори

Генераторите за постоянен ток преобразуват механичната енергия в постояннотокова електрическа енергия. Те се използват за автономно захранване на постояннотокови двигатели при регулирането им (система генератор—двигател), за електролиза и галванопластика, като възбудители на синхронни машини, като заваръчни генератори и др.

Постояннотоковите генератори са генератори с независимо възбуждане и със самовозбуждане. Принципните им схеми са показани на фиг. 11.6. Генераторите с голяма мощност работят с независимо възбуждане. При малка и средна мощност те имат паралелно или смесено възбуждане. С възбуждане от постоянни магнити са изпълнени т. нар. тахогенератори — информационни микромашини, чието котвено напрежение е пропорционално на честотата на въртене.

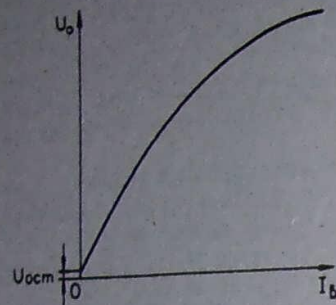
Получаваната от първичния двигател механична мощност P_1 се преобразува в полезна електрическа мощност на изходите на генератора P_2 . Това пресъобразуване е съпроводено със загуби на мощност:

$$P_2 = P_1 - \Sigma p;$$

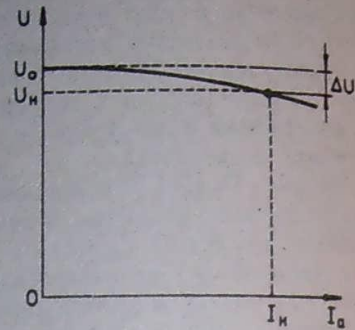
$$\Sigma p = p_v + p_a + p_{\text{ч}} + p_{\text{с}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}},$$

където p_v , p_a са съответно електрически загуби във възбудителната и котвената верига; $p_{\text{ч}}$ — електрически загуби в четковия

контакт; p_c — загуби в стоманата на котвата; $p_{мех}$ — механични загуби; p_d — допълнителни загуби.
Вижда се, че в генератора съществуват същите видове загуби както в двигателя — (11.28).



Фиг. 11.33. Характеристика на празен ход



Фиг. 11.34. Външна характеристика на генератор с независимо възбуждане

Свойствата на генератора се определят от начина на възбуждането му. Тези свойства се анализират с помощта на характеристиките, които представляват зависимости между основните величини, определящи работата на генератора. Основните характеристики на генераторите за постоянен ток са същите както съответните характеристики на синхронните генератори. Тук ще разгледаме само някои от тях за генератор с **независимо възбуждане**.

Характеристиката на празен ход (х. п. х.) е зависимостта $U_0 = f(I_f)$ при отворена верига на котвата ($I_a = 0$) и постоянна честота на въртене $n = \text{const}$ (фиг. 11.33). Ст (11.6) и (11.15) се намират

$$U_0 = E_a = k\Phi.$$

Следователно х.п.х. $U_0 = f(I_f)$ в друг мащаб представлява зависимостта $\Phi = f(I_f)$. Това е магнитната характеристика, от която може да се съди за степента на насищане в магнитната верига. Трябва да се има предвид, че при опитното определяне на х. п. х. възбудителният ток трябва да се изменя само в една посока. В противен случай точките не са на един и същи хистерезисен цикъл и затова се разсейват. Напрежението $U_{ост}$, което се получава при $I_a = 0$, се дължи на остатъчния магнетизъм на главните полюси. То е 2—3% от номиналното напрежение.

Външната характеристика (фиг. 11.34) е зависимостта на напрежението на изходите на генератора от тока в котвата при постоянни стойности на честотата на въртене и възбудителния ток:

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

От тази характеристика се определя намаляването на напрежението при увеличаване натоварването на генератора. То се дължи на пада на напрежение в котвената верига $r_a I_a$ и на намаляване на E_a вследствие намаляването на магнитния поток под действие на реакцията на котвата. Изменението на напрежението между празен ход ($I_a = 0$) и номинално натоварване ($I_a = I_n$), изразено в %, е

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%.$$

За генераторите с независимо възбуждане ΔU_n е в граници 5—15%.

Възбудителната намотка на генераторите с паралелно възбуждане е свързана паралелно на котвената намотка. Самовъзбудането им е възможно само при изпълнение на определени условия. Тези условия са свързани с процеса на изменение на възбудителния ток, който може да се изследва чрез уравнението

$$(11.46) \quad U_n = R_n i_n + \frac{d(L_n i_n)}{dt}.$$

Това уравнение е записано за контура на възбудителната намотка, който има съпротивление R_n и индуктивност L_n . Тъй като при празен ход $U_0 = U_n$, зависимостта $U_n = f(i_n)$ ще представлява характеристиката на празен ход, показана на фиг. 11.35 (крива 1). На същата фигура е построена и правата 2, която представлява характеристиката $R_n i_n = f(i_n)$. Разликата между ординатите на кривата 1 и правата 2 е $\frac{d(L_n i_n)}{dt}$, както следва от (11.46).

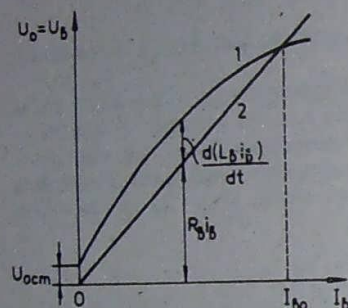
Когато тази разлика е положителна, т. е. $\frac{di_n}{dt} > 0$, токът във възбудителната намотка се увеличава, докато достигне стойност $I_{н0}$ — пресечната точка на х. п. х. и правата 2. В тази точка производната $\frac{di_n}{dt} = 0$ и се установява възбудителен ток $I_{н0} = \text{const}$. Процесът на самовъзбуждане е завършен. Може да се каже, че това е процес с положителна обратна връзка по напрежение.

От направения анализ следва, че за да може да се самовъзбуди един генератор с паралелно възбуждане, е необходимо да бъдат изпълнени следните условия:

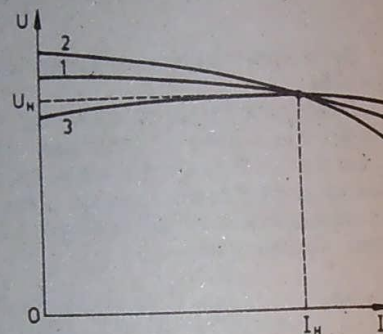
1. Процесът на самовъзбуждане може да започне само ако съществува остатъчен магнетизъм. В случай че $U_{ост} = 0$, е необходимо да се включи възбудителната намотка към външен източник на постоянен ток, например акумулаторна батерия.

2. Полярността на изводите на генератора се определя от полярността на $U_{ост}$. Ако при зададена посока на въртене е необходимо да се промени полярността на изводите на генератора, трябва да се смени и полярността на $U_{ост}$ чрез пренамагнитване. За да нараства възбудителният ток, краищата на възбудителната намотка трябва да са свързани правилно.

3. Положителна разлика между х. п. х. (крива 1) и правата $R_a = \text{const}$ (права 2) се получава само ако тези линии се пресичат. Следователно съпротивлението на възбудителната верига R_b трябва да бъде минимално, равно само на съпротивлението на възбудителната намотка.



Фиг. 11.35. Самовъзбуждане на генератор с паралелно възбуждане



Фиг. 11.36. Сравнение на външните характеристики на генератори с независимо (1), паралелно (2) и смесено съпосочно (3) възбуждане

Външната характеристика на генератори с паралелно възбуждане се снима при неизменно съпротивление на възбудителната верига $R_a = \text{const}$. Тя се характеризира с по-голямо изменение на напрежението ΔU отколкото при външната характеристика на генератора с независимо възбуждане. Причината е, че с нарастване на товара напрежението намалява. Тъй като възбудителната верига се захранва от напрежението на изводите, намалява и възбудителният ток. Това от своя страна води до намаляване на магнитния поток и е. д. н. на котвената намотка.

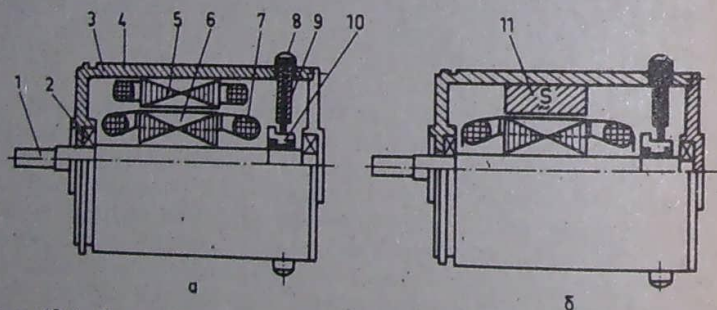
При генераторите със смесено възбуждане съществува възможността да се компенсира изменението на напрежението ΔU , т. е. да се постигне приблизително постоянна стойност на напрежението при изменение на товара от празен ход до номиналния. Това се постига чрез съпосочно свързване на последователната и паралелната възбудителна намотка. В случая с увеличение на товарния ток се увеличава м. д. н. на последователната намотка и магнитния поток Φ . Последователната възбудителна намотка може да се проектира по такъв начин, че увеличението на Φ , респ.

повишаването на индуктираното е. д. н. в котвата E_a , да съответствува по стойност на пада ΔU .

Качественият анализ на свойствата на генератори с различни възбудителни системи е илюстриран на фиг. 11.36, където са сравнени външните характеристики на генератори с независимо (1), паралелно (2) и смесено съпосочно (3) възбуждане. От фигурата се вижда, че най-благоприятна външна характеристика има генераторът със смесено възбуждане при съпосочно свързване на възбудителните намотки.

12.1. Постояннотокови
микродвигатели за обща
употреба

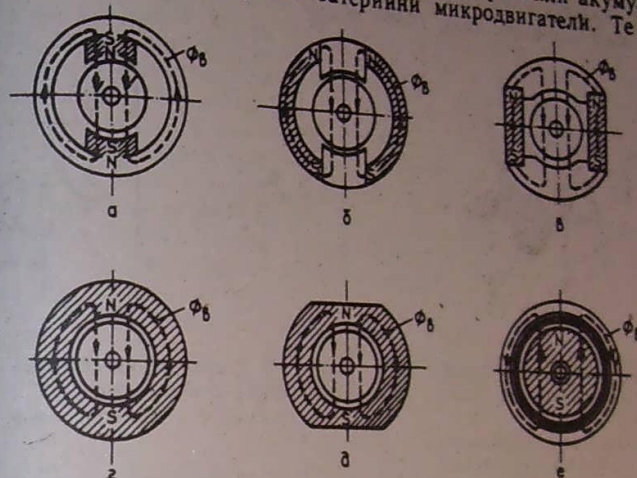
Това са малки колекторни постояннотокови двигатели, обикновено двуполусни, без допълнителни полюси и с неподвижни четкодържатели от тръбен тип, поставени в неутралната линия. Възбуждането им е електромагнитно (фиг. 12.1 а) или от постоянни магнити (магнитоелектрично) — фиг. 12.1 б. На фиг. 12.2 са показани различни видове магнитни системи според формата на постоянните магнити.



Фиг. 12.1. КOLEKTOPHH ПOCтOЯHHOTOКOBI MHKPOДBИГATEЛИ
а — с електромагнитно възбуждане; б — с възбуждане от постоянни маг-
нити; 1 — вал, 2 — лагер, 3 — тяло, 4 — възбудителна намотка, 5 — полюс,
6 — роторен пакет, 7 — котвена намотка, 8 — четкодържател, 9 — четка,
10 — колектор, 11 — постоянен магнит

Двигателите се изпълняват за напрежения 220 V, 110 V или 36, 27, 24, 18, 15, 12, 9, 6, 4, 5, 3 V, като честотите на въртене варират от 2000 до 6000 min⁻¹, най-често 3000 min⁻¹. Употребяват се в различни области на автоматиката, приборостроенето, електрониката, информатиката, бита и военната техника. Удотребява

се и в автомобилите като стартерни двигатели или като различни други спомагателни двигатели. Двигателите за ниски напрежения са с постоянни магнити и се захранват от батерии или акумулатори и понякога се наричат батерийни микродвигатели. Те се

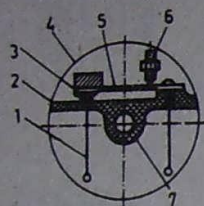


Фиг. 12.2. Видове магнитни системи с постоянни магнити
а, в — призматични; б — скобообразни; г, д, е — цилиндрични

употребяват много в битовата техника, кино- и звуковата апаратура и др. Батерийните двигатели имат малък брой колекторни пластини ($K < 10$). Най-малките от тях са с 3 колекторни пластини и 3 секции на котвената намотка, свързани в Δ . Често секциите или колекторните пластини се шунтират с нелинейни резистори (варистори), които са на котвата и се въртят заедно с нея, от което искрението се намалява. За повишаване на надеждността на колектора и за намаляване на преходния пад в четките те се правят метални във вид на плоски пружини или мрежички, посребряват се или се покриват с други благородни метали; посребряват се и колекторът. В особено отговорни случаи може да се приложи и колекторът. Почти винаги двигателите имат противосмутителни филтри. В някои случаи има по две възбудителни намотки, навити срещуположно на едни и същи полюси. По този начин се постигат лесно реверсиране и бързо спиране чрез противовключване, ако реверсирането се прави в движение.

В редица случаи, когато е необходима строго постоянна честота на въртене, двигателите се снабдяват с центробежен (центробежно-вибрационен) стабилизатор (регулатор) на честотата на въртене — фиг. 12.3. В една от най-разпространените конструкции той представлява изолационен диск, поставен на вала и носещ върху себе си две контактни тела — подвижно и неподвижно.

Подвижното лежи на плоска пружина, която се поддържа от регулиращ винт. Действието му е подобно на центробежния прекъсвач при еднофазните асинхронни микродвигатели с изключваеми пускови елементи (вж. глава осма).

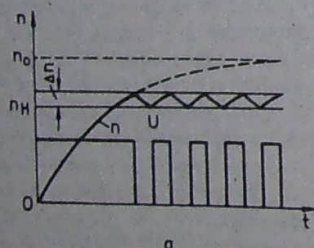


Фиг. 12.3. Центробежен стабилизатор на ъгловата скорост

1 — изведен проводник; 2 — основа, 3 — контактни тела, 4 — тежест, 5 — пружина, 6 — настройващ винт, 7 — вал

При превишаване на зададената честота на въртене тежестта се отдалечава от центъра и прекъсва тока, от което честотата на въртене намалява и контактът отново се включва.

Различни схеми на включване на центробежния стабилизатор са показани на фиг. 12.4.

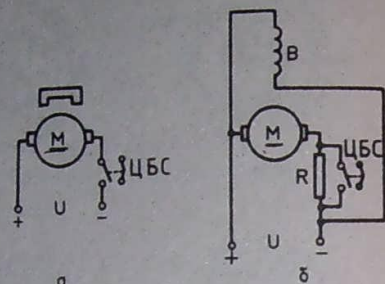


Фиг. 12.5. Към обяснението на стабилизацията на ъгловата скорост
а — точност на стабилизацията; б — механични характеристики

В редица случаи честотата на въртене се стабилизира по безконтактен начин — чрез електронен стабилизатор на напрежението, захранващо двигателя.

За да е възможно изобщо стабилизирането, необходимо е

Фиг. 12.4. Схеми на включване на центробежен стабилизатор
а — директно; б — през резистор



честотата на въртене n_0 , която развива двигателят без стабилизатор, да бъде по-голяма от стабилизираната (номиналната) му честота на въртене n_n — фиг. 12.5 а. Стабилизаторът може да се настрой така, че точността на стабилизация да бъде голяма, т. е. зоната на изменение Δn да бъде много тясна. При най-добрите образци $\Delta n < 1\%$, което в повечето случаи е напълно достатъчно.

От механичните характеристики на фиг. 12.5 б става ясно, че стабилизацията е по два параметъра — по напрежение и по момент. Честотата на въртене се поддържа постоянна както при увеличаване на напрежението, така и при намаляването му, но до известна граница, зависеща от съпротивителния момент. Също така честотата на въртене се поддържа постоянна при намаляване на съпротивителния момент и при увеличаването му, но до известна степен, зависеща от напрежението.

1.2.2. Универсални колекторни двигатели

По устройство те са постояннотокови двигатели с последователно възбуждане, които могат да се захранват и с еднофазен променлив ток. За да могат да работят с променлив ток, магнитната им система е изцяло шихтована. Обикновено те са с висока честота на въртене — $n_n = 2000 \div 20\,000 \text{ min}^{-1}$, и напрежение 220 V.

При големи мощности се употребяват в електрическия транспорт, а при малки мощности — в битовата техника. Главното им положително качество е възможността за плавно регулиране на ъгловата скорост.

По принцип всеки постояннотоков двигател може да работи с променлив ток, но за да няма големи загуби в статора от вихровите токове и голямо загряване, статорният магнитопровод трябва да бъде шихтован. При това честотата на въртене не зависи от честотата на захранващото напрежение.

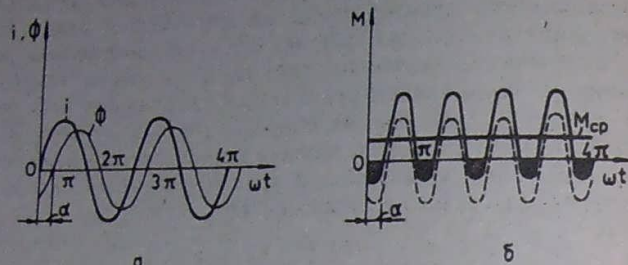
За да се обясни възможността за работа с променлив ток и възникването на въртящ момент, трябва да се има предвид, че при последователно възбуждане възбудителният поток Φ е пропорционален на котвения ток I , който в същото време е и потокът се дителен. Следователно при променлив ток токът и потокът се променят едновременно. Това е еквивалентно на едновременно бърза смяна (2 / пъти в секунда) на полярността на двете намотки (котвената и възбудителната), поради което посоката на въртене се запазва. Математическото доказателство на това е направено на фиг. 12.6.

Съгласно фиг. 12.6 а токът и потокът се изменят синусоидално.

Тъй като захранването е еднофазно, магнитното поле е пулсиращо. Тогава

$$i = I_m \sin \omega t;$$

$$\Phi = \Phi_m \sin (\omega t - \alpha),$$



Фиг. 12.6. Електромагнитен момент на еднофазен колекторен двигател

а — изменение на тока и потока; б — пулсации на момента

където α е ъгълът на дефазироване между тока I и възбудения от него поток Φ . Този ъгъл е ъгълът на загубите в стоманата на двигателя и е много малък — няколко градуса. Практически може да се приеме, че I и Φ са почти синфазни.

При променлив ток въртящият момент е

$$(12.1) \quad m = c_M i \Phi = c_M I_m \sin \omega t \cdot \Phi_m \sin (\omega t - \alpha) = \\ = \frac{1}{2} c_M I_m \Phi_m \cos \alpha - \frac{1}{2} c_M I_m \Phi_m \cos (2\omega t - \alpha) = \\ = M_1 \cos \alpha - M_2 \cos (2\omega t - \alpha).$$

Моментът се състои от две съставки — постоянна и променлива с двойна честота (фиг. 12.6 б). Средната стойност на момента е равна на постоянната му съставка, защото средната стойност на променливата съставка е равна на нула:

$$(12.2) \quad M = M_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{1}{2} c_M I_m \Phi_m \cos \alpha.$$

Това е илюстрирано на фиг. 12.6 б, от която се вижда, че моментът е отрицателен през незначителна част от периода ($\angle \alpha$), докато през по-голямата част от периода е положителен.

Въпреки наличието на променлива съставка на момента поради голямата си инертност котвата се върти равномерно (подоб-

но е положението и при еднофазните асинхронни двигатели с елипсично или пулсиращо магнитно поле).

$$(12.3) \quad M = \frac{1}{2} c \sqrt{2} I \Phi_m \cos \alpha = \frac{c}{\sqrt{2}} I \Phi_m \cos \alpha$$

или

$$(12.4) \quad \bar{M} = \frac{\bar{M}}{\sqrt{2}} \cos \alpha.$$

В тези уравнения се използва ефективната стойност само на тока, защото от енергийни съображения при електрическите величини се работи с ефективни стойности, а при магнитните — с максимални.

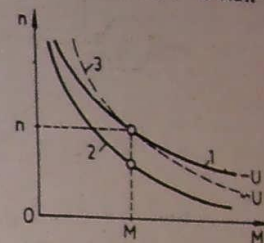
От (12.4) се вижда, че за да се получи максимален момент, необходимо $\alpha \rightarrow 0$. Това обяснява защо за работа с променлив ток не се употребяват двигатели с паралелно възбуждане, а само с последователно. При паралелно възбуждане възбудителната намотка има голяма индуктивност и поради това потокът Φ ще бъде дефазирован спрямо тока I на ъгъл $\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}$. Тогава $M \rightarrow$

$\rightarrow 0$ и двигателят, захранван с променлив ток, няма да се върти.

Работата на колекторния двигател при постоянен и при променлив ток не е еднаква. При постоянен ток той има по-добри енергийни показатели, по-голям въртящ момент и консумира по-малък ток отколкото при променлив ток. Една от причините за това са загубите в стоманата на статора, които липсват при постоянен ток. Освен това моментът при постоянен ток е $\sqrt{2}$ пъти по-голям от момента при променлив ток. Друга много съществена причина е, че напрежението и токът са дефазирани поради наличието при променлив ток на индуктивностите на намотките.

Захранването с двата вида ток оказва най-силно влияние върху честотата на въртене, т. е. на механичната характеристика. При еднакъв съпротивителен момент честотата на въртене при постоянен ток е по-висока от тази при променлив ток, съответно механичната характеристика при постоянен ток е разположена над механичната характеристика при променлив ток (фиг. 12.7). Това означава още, че при преминаване от един вид ток към друг значително се изменя номиналната скорост.

Математично обяснение на това може да се получи, като се напише уравнението за честотата на въртене и е. д. н. на въртене.



Фиг. 12.7. Работни характеристики на еднофазен колекторен двигател

1 — при постоянен ток; 2 — при постоянен момент; 3 — при променлив ток

При променлив ток

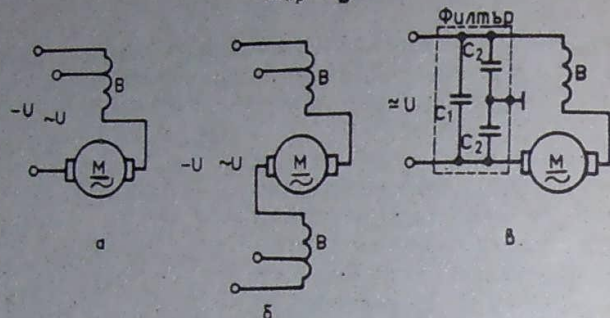
$$-\dot{E}_{вр} = \dot{U} - i(Z_a + Z_r).$$

При постоянен ток

$$E_{вр} = U - I(r_a + r_r),$$

като винаги

$$E_{вр} = c_E n \Phi.$$



Фиг. 12.8. Схеми на универсален колекторен двигател
а — условна схема; б — действителна схема; в — схема на филтър против радиосмущения

Тъй като

(12.5)

$$n = \frac{E_{вр}}{c_E \Phi},$$

вижда се, че $\tilde{n} < \bar{n}$, защото $\tilde{E}_{вр} < E_{вр}$. Разликата се дължи на падовете на напрежение в x_a и x_r при променлив ток.

В много случаи това създава явни неудобства, например при механизми, които не допускат изменение на ъгловата скорост. За да се запази номиналната ъглова скорост константна, се прави по един извод от възбудителните бобини, така че при постоянен ток те се включват целите, а при променлив ток — част от навивките им (фиг. 12.8). Условната схема е показана на фиг. 12.8 а, а действителната — на фиг. 12.8 б. По този начин при променлив ток се намалява броят на навивките на възбудителната намотка, което води до намаляване на x_a и съответно до повишаване на $\tilde{E}_{вр}$ и $\tilde{n}$. Механичната характеристика се премества успоредно нагоре, но не се покрива с характеристиката при постоянен ток, а се пресича с нея в една точка. Тази точка се приема за номинална (фиг. 12.7).

Най-сериозният недостатък на тези двигатели при променлив ток е лошата им комутация. Тя се съпровожда със значително искрене под четките, което е свързано с редица неприятни ефек-

ти, като силен шум, нагар на колектора, износване и корозирање на колектора и четките, взривоопасност, радиосмущения и др. Еднофазните колекторни двигатели се реверсират, като се разменят двата извода на коя да е от намотките — котвената или възбудителната.

За борба с радиосмущенията се използват електромагнитни екрани и електрически филтри. Екранът представлява метална мрежа или фолио, с която се обвива двигателят и задължително се заземява.

Електрическият филтър против радиосмущения в общия случай е комбинация от R , L , C елементи, свързани по определена схема. Най-ефикасна е пълната RLC или LC комбинация, но тя усложнява схемата и уголемява и оскъпява филтъра. Затова по-често се употребяват прости C филтри, един от които е показан на фиг. 12.8 в. Той се сформира в блок от проходни кондензатори и двигателят се захранва през него. Кондензаторите са с малък капацитет и имат много голямо съпротивление за тока с честотата на захранването. Съпротивлението им за високочестотните токове, които предизвикват смущенията, е малко и те ги шунтират. Тъй като в действителност възбудителните оббини са две и котвата е свързана между тях, те играят ролята на филтриращи дросели.

12.3. Безколекторни постояннотокowi микродвигатели

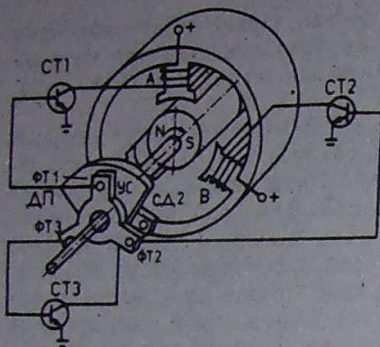
Наричат се още безконтактни, безчеткови, вентилни или двигатели с електронна комутация. Въпреки че са без четки и без механичен колектор, те не са безкомутатор. Функцията на комутатор се изпълнява от електронна схема.

Необходимостта от безколекторни двигатели се диктува главно от съображения за надеждност, тъй като колекторно-четковата система при обикновените постояннотокowi двигатели е най-не сигурният възел и е източник на много повреди.

За изясняване на принципа на действие трябва да се припомним (гл. 11), че постояннотокowa е машината само за външната верига; вътре „в себе си“ тя е синхронна машина. Броят на фазите m е равен на броя на секциите S , респ. на броя на колекторните пластини K . Освен това K -фазната котвена намотка е свързана в многогълник (K -гълник). Колекторът при генераторите изпълнява функцията на механичен токоизправител, а при двигателите — на механичен инвертор. В конструктивно отношение постоянно-токовата машина представлява обрната синхронна машина — котвата е в ротора, а индукторът — в статора.

От тези разсъждения може да се заключи, че за постоянно-

токовата машина е възможна и обратната конструкция — котвата да е в статора, а индукторът в ротора. Тогава вместо сложния колекторно-четков възел е възможно използването на електронен (транзисторен или тиристорен) комутатор. Тъй има задачата да



Фиг. 12.9. Принципно устройство на безколекторен постояннотоков микро-двигател

инвертира постоянния ток — да го нахвърля на импулси, които трябва да се разпределят поредно към фазите както при стъпковия двигател. За да не се усложнява и осъществява много електронната схема, двигателят се прави с малък брой секции (обикновено три). Възбуждането му е от постоянни магнити.

На фиг. 12.9 е показано принципното устройство на безколекторен постояннотоков двигател, с което се обяснява и работата му. На фигурата са показани само

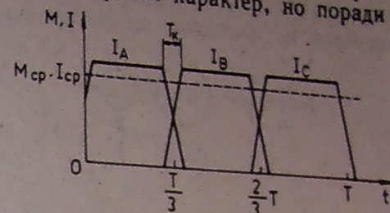
принципно важните елементи. Индукторът е в ротора: той е двуполусен постоянен магнит (явно- или неявнополусен), т. е. роторът е активен, но по принцип може да бъде и реактивен. Котвата е в статора. Котвената намотка е трисекционна (трифазна), свързана в звезда с изведена неутрала (т. нар. лъчева намотка). Импулсите се подават към съответните фазни намотки чрез силови транзистори, например по схема със заземен емитер.

Транзисторите се управляват от базовите вериги, към които се подават управляващи импулси от датчик на положението — основен и най-необходим елемент на безколекторния двигател. Датчикът на положението ДП, показан на фигурата, е оптичен. Той се състои от сигнален (управляващ) сектор (обтуратор) УС, закрепен на вала и въртящ се с него, и оптронни двойки, съставени от светодиоди СД и фототранзистори ФТ. Сигналният сектор е непрозрачно тяло с централен ъгъл, малко по-голям от 120° . Останал сигналният сектор съвпада с неутралната линия на роторния магнит N—S. Сигналният сектор се движи между светодиода и фототранзистора на всяка оптронна двойка.

Двигателят работи по следния начин.

При въртенето на ротора сигналният сектор пресича светлинния лъч, излъчван от светодиода (обикновено невидима инфрачервена светлина), като се прекъсва попадащата върху фототранзистора светлина. Така от оптронната двойка се подава управляващ сигнал към съответния силов транзистор СТ. Той се отпушва и през съответната статорна намотка протича ток. Токът взаимо-

действа с магнитното поле на ротора, създава се въртящ момент и роторът се завърта. След 120° по същия начин се включва съседната фаза, после другата и така роторът се движи непрекъснато. Въртящият момент има импулсен характер, но поради значителната си инертност роторът се върти равномерно. Тъй като възбуждането е от постоянен магнит, потокът $\Phi = \text{const}$ и електромагнитният момент е пропорционален на тока. Това означава, че формата на кривата на момента повтаря формата на тока, а също и средната му стойност — фиг. 12.10.



Фиг. 12.10. Графики на тока и момента на безколекторен постояннотоков двигател

От принципа на действие на двигателя стават ясно, че безколекторният двигател работи като стъпков двигател. Дори по устройството на активната си част той прилича на трифазен стъпков двигател или на трифазен синхронен двигател с активен ротор, но без пускова намотка. И безколекторният, и стъпковият двигател се захранват с постояннотокови импулси, които се разпределят към фазите от електронен комутатор. Разликата между двата двигателя е в наличието на датчик на положението в безколекторния двигател. Датчикът на положението създава обратна връзка по честота на въртене и по положение, благодарение на които безколекторният двигател сам управлява своя комутатор. По този начин се наподобява работата на колекторен двигател — фиг. 12.11 а.

При стъпковия двигател липсват датчик и обратна връзка (фиг. 12.11 б). Честотата на импулсите от електронния комутатор не зависи от честотата на въртене, затова е възможно и излизането на двигателя от синхронизъм.

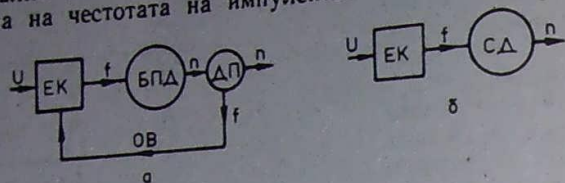
Освен оптронния датчик се употребяват и други видове датчици на положение — индуктивни (свързани в мост), кондензаторни, радиоактивни, холотронни, магниторезисторни, магнитотриоди и др.

Реверсирането на безколекторния двигател се извършва чрез промяна на фазовия ред, като се разменят две от фазите на намотките или чрез датчика на положение. Промяна на поляритета на захранващото напрежение не бива да се прави, защото е опасно за електронната схема.

Регулирането на честотата на въртене може да стане по няколко начина.

Чрез изменение на захранващото напрежение — това по принцип е възможно, но в малък диапазон, защото повишаването му се ограничава от възможностите на полупроводниковите елементи,

а при силното му понижаване датчикът на положението може да престане да работи. Тези двигатели се правят за ниско напрежение според възможностите на полупроводниковите елементи. По-рационално е импулсното регулиране, което се извършва чрез промяна на честотата на импулсите.



Фиг. 12.11. Блок-схеми на безколекторен двигател (а) и на стъпков двигател (б)

Към недостатъците на безколекторните двигатели следва да се отнесат високата им цена, по-лошите показатели и по-сложната конструкция. Засега те все още не могат да заместят обикновените колекторни двигатели.

12.4. Изпълнителни постояннотокowi двигатели

Изпълнителите постояннотокowi двигатели представляват постояннотокowi колекторни двигатели, които са изработени по-прецизно и са с ненаситена магнитна система. Четките са в неутралната линия, двигателите са двуполусни, нямат допълнителни полюси, а възбуждането е независимо електромагнитно или с постоянни магнити. При електромагнитно възбуждане статорните полюси са шихтовани, за да се намалят загубите от вихрови токове при преходните процеси. В сравнение с обикновените двигатели при еднаква мощност изпълнителните двигатели са по-големи и по-скъпи.

Използват се три вида управление — котвено, полюсно и импулсно. Общата теория на управлението на изпълнителните двигатели е разгледана в глава осма.

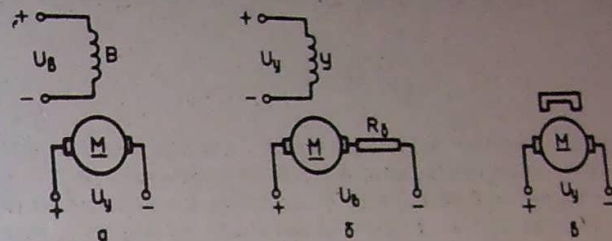
1. Котвено управление — фиг. 12.12 а, в. Това е основният вид управление на изпълнителните постояннотокowi двигатели. Възбудителна намотка е статорната (полюсната), а управляваща — роторната (котвената). Двигателите с постоянни магнити априори са с котвено управление.

Котвеното управление представлява регулиране на честотата на въртене чрез изменение на котвеното напрежение ($U_a = U_y = \text{var}$) при постоянно полюсно напрежение ($U_n = U_n \cdot \text{const}$).

Уравнения на механичните и регулационни характеристики в относителни единици:

Е.д.н. в котвената намотка е

$$E_y = c_E n \Phi_n = c_E n c_\Phi I_n = c_E c_\Phi n \frac{U_n}{r_n}$$



Фиг. 12.12. Схеми за управление на постояннотокowi изпълнителен микродвигател

а, в — котвено управление; б — полюсно управление

Тук се предполага, че магнитната система е ненаситена и реакцията на котвата не влияе на потока Φ_n , който остава постоянен. Също така се приема температурната независимост на r_n . В противен случай характеристиките са нелинейни и температурно нестабилни.

Електромагнитният момент е

$$M = c_M I_y \Phi_n = c_M I_y c_\Phi I_n = c_M c_\Phi I_y \frac{U_n}{r_n}$$

където съгласно глава осма

$$c_E = \frac{pN}{a}; \quad c_M = \frac{c_E}{2\pi}$$

Основно уравнение е

$$U_y = E_y + r_y I_y$$

в което

$$r_y = r_a + r_n$$

$$I_y = \frac{U_y - E_y}{r_y}$$

Тогава

$$M = \frac{c_M c_\Phi U_y U_n}{r_y r_n} - \frac{c_M c_\Phi E_y U_n}{r_y r_n}$$

и уравнението на механичната характеристика е

$$(12.6) \quad M = \frac{c_M c_\Phi U_y U_n}{r_y r_n} - \frac{c_E c_M c_\Phi^2 U_y^2}{r_y r_n^2} n.$$

За преминаването към относителни единици трябва да се има предвид, че базисно напрежение е U_n , а коефициентът на сигнала е

$$(12.7) \quad \alpha = \frac{U_y}{U_n} = \frac{U_y}{U_{yn}}.$$

Базисен момент е номиналният пусков момент $M_{пн}$ при $\alpha=1$, който се определя, като в (12.6) се положи $n=0$.

Базисна честота на въртене е честотата на въртене на идеален празен ход $n_{он}$ при $\alpha=1$. Това е честотата на въртене, при която котвеният ток се анулира и $U_y = E_y$. За нейното определяне в (12.6) се полага $M=0$ или $I_y=0$.

Като следствие се получават зависимостите:

$$(12.8) \quad M_n = \alpha M_{пн};$$

$$(12.9) \quad n_n = \alpha n_{он}$$

или

$$(12.10) \quad \frac{n}{n_{он}} = \frac{E_y}{U_{yn}} - \frac{U_y - r_y I_y}{U_{yn}} = 1 - \frac{I_y}{I_{yn}},$$

където $I_{yn} = \frac{U_y}{r_y}$ е пусковият ток на котвената намотка.

Като се имат предвид горните съотношения и че в относителни единици $\mu = \frac{M}{M_{пн}}$ и $v = \frac{n}{n_{он}}$, за да се получи уравнението на механичната характеристика, трябва (12.6) да се раздели първо на $M_{пн}$, а след това на $n_{он}$.

Тогава уравнението на механичните характеристики е

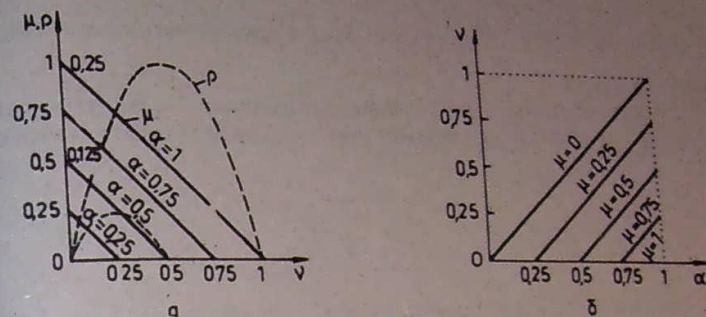
$$(12.11) \quad \mu = \alpha - v,$$

а на регулационните —

$$(12.12) \quad v = \alpha - \mu.$$

Това са уравнения на семейство прави и успоредни линии (фиг. 12.13) за идеалния изпълнителен постояннотоков двигател —

двигател с ненаситена магнитна система, с постоянно съпротивление на четките и с константни съпротивления на намотките. Характеристиките на реалните изпълнителни двигатели са до известна степен нелинейни.



Фиг. 12.13. Характеристики при котвено управление
а — механични; б — регулационни

От (12.11) и (12.12) могат да се определят по-важните точки на характеристиките. От механичните характеристики на фиг. 12.13 а те са:

— точките на късо съединение μ_n , които се намират на ординатната ос, където $v=0$:

$$\mu_n = \alpha, \text{ т. е. } M_n = \alpha M_{пн} \text{ или } \frac{M_n}{M_{пн}} = \frac{U_y}{U_n} = \frac{U_y}{U_{yn}};$$

— точките на празен ход v_0 , които се намират на абсцисната ос, където $\mu=0$:

$$v_0 = \alpha, \text{ т. е. } n_0 = \alpha n_{он} \text{ или } \frac{n_0}{n_{он}} = \frac{U_y}{U_n} = \frac{U_y}{U_{yn}}.$$

От регулационните характеристики на фиг. 12.13 б това са:

— точките на тръгване (напрежението на тръгване, респ. на спиране) α_t , които се намират на абсцисната ос, където $v=0$:

$$\alpha_t = \mu = \frac{M}{M_{пн}} \text{ или } \frac{U_{yt}}{U_n} = \frac{U_{yt}}{U_{yn}} = \frac{M}{M_{пн}}.$$

От регулационните характеристики се вижда, че при котвено управление постояннотоковите изпълнителни двигатели нямат самоход, тъй като при $U_y=0$ и $n=0$. Обаче тук липсва допълнителният електромагнитен спирачен момент, който при асинхронните изпълнителни двигатели ускорява спирането.

Зависимостта $p = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{дпн}}}$ е параболична (фиг. 12.13 а):

$$(12.13) \quad p = \mu v = (\alpha - v) v = \alpha v - v^2,$$

с максимум при $v = \frac{v_0}{2}$, където $P_{\text{дпн}}$ е електромагнитната мощност при $\alpha = 1$.

Времекостанти при котвено управление. Електрическата (електромагнитната) времекостанта на управляващата намотка е

$$T_E = \frac{L_a}{r_a}.$$

Механичната (електромеханичната) времекостанта на двигателя според казаното в глава осма е

$$(12.14) \quad T_M = J \frac{\Omega_0}{M_{\text{пн}}} = J \frac{\alpha \Omega_{\text{он}}}{\alpha M_{\text{пн}}} = J \frac{\Omega_{\text{он}}}{M_{\text{пн}}}$$

и не зависи от коефициента на сигнала α .

Ако в (12.14) се заместят $\Omega_{\text{он}}$ и $M_{\text{пн}}$ от (12.6) и като се използват означенията

$$k_E = \frac{c_E}{2\pi} \Phi_b = k_M = c_M \Phi_b = k,$$

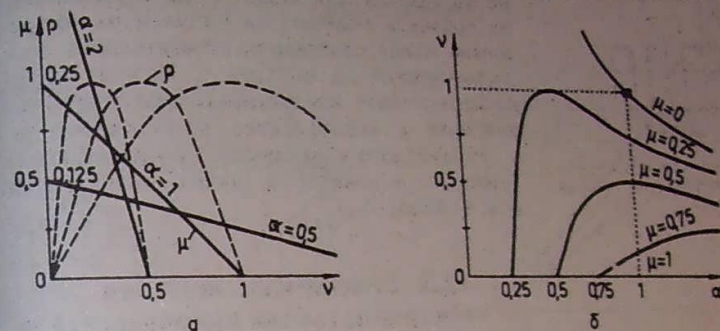
се получава израз, често употребяван във фирмената литература

$$(12.15) \quad T_M = J \frac{r_y}{k^2}.$$

2. *Полюсно управление* — фиг. 12.12 б. Този вид управление се прилага значително по-рядко от котвеното. При полюсно управление намотките сменят функциите си — възбудителна е роторната (котвената), а управляваща — статорната (полюсната). При двигателите с постоянни магнити не може да се приложи полюсно управление. За разлика от котвеното полюсното управление представлява регулиране на честотата на въртене чрез изменение на полюсното напрежение ($U_n = U_y = \text{var}$) при постоянно котвено напрежение ($U_a = U_b = \text{const}$). Както е известно от общата теория (глава единадесета), такова регулиране е възможно, но в тесен диапазон, защото е опасно за двигателя. И наистина при $U_y = U_n \rightarrow 0$

магнитният поток $\Phi \rightarrow 0$ и индуктираното в котвата напрежение $E_b \rightarrow 0$. Тогава в котвата протича голям ток, равен на тока на късо съединение (пусковия ток).

Тъй като $r_b \ll r_y$, пусковият ток е много по-голям от номиналния и котвената намотка ще изгори. За предотвратяване на това



Фиг. 12.14. Характеристики при полюсно управление
а — механични; б — регулиращи

в схемата се поставя токоограничаващ (баластен) резистор R_b , който ограничава пусковия ток до номиналния.

Уравненията на характеристиките могат да се изведат както при котвено управление. Ще ги приложим без доказателство — фиг. 12.14:

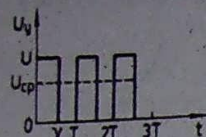
$$(12.16) \quad \mu = \alpha - \alpha^2 v;$$

$$(12.17) \quad v = \frac{\alpha - \mu}{\alpha^2}.$$

Уравнение (12.16) е за механичните характеристики, които са прави линии с различна стръмност — фиг. 12.14 а. Регуляционните характеристики (12.17) са силно нелинейни, някои от които са двузначни и непригодни за управление. Управление е възможно при $\mu > 0.5$, при което регуляционните характеристики, макар и нелинейни, стават еднозначни.

Съгласно горните съотношения честотата на въртене при прав ход ($\mu = 0$) и при липса на управляващ сигнал ($\alpha = 0$) е безкрайно голяма ($v_0 = \infty$). Това е случай, който отговаря на шун-крайно голям без възбуждане. Теоретично той трябва да има безкрайно голяма честота на въртене, която на практика е твърде голяма, но не безкрайна, защото се ограничава от вътрешния съпротивителен момент M_0 на двигателя вследствие на механичните загуби от триене в лагерите, четките и вентилатора.

3. Импульсно (широчинно-импульсно) управление. От статичен полупроводников (транзисторен или тиристорен) преобразувател на котвената намотка на двигателя се подават еднополярни правоъгълни постояннотоккови импулси с постоянна честота, но с променяща се ширина (фиг. 12.15). Честотата



Фиг. 12.15. Широ-импульсно управление

на въртене на двигателя е пропорционална на средната стойност на импулсното напрежение и следователно на относителната продължителност на импулса γ . По вида на характеристиките на двигателя импулсното управление е еквивалентно на котвеното.

Импулсното управление е много перспективно, то е плавно, в широк диапазон и почти беззагубно.

12.5. Видове изпълнителни постояннотоккови микродвигатели

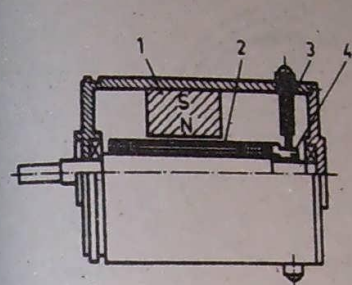
Постояннотоквите изпълнителни микродвигатели се изработват обикновено за ниски напрежения (≤ 110 V), честоти на въртене $2000 \div 3000 \text{ min}^{-1}$ и мощности $50 \div 100$ W. Конструкциите им са много разнообразни.

1. *Изпълнителен постояннотокков микродвигател с обикновена барабанна котва.* Това е основният тип постояннотокков изпълнителен микродвигател (фиг. 12.1). Принципно му устройство не се различава от устройството на обикновените постояннотоккови машини и е описано в т. 12.1. Този двигател се употребява там, където не е необходимо особено голямо бързодействие. Времеkonстантата му е около няколко десетки милисекунди. Твърде често се комбинира с встроен постояннотокков тахогенератор, който се използва за обратна връзка по честотата на въртене, за електрическо диференциране или за демпфериране.

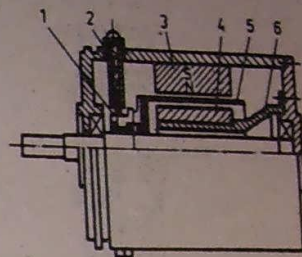
2. *Изпълнителен постояннотокков микродвигател с гладка безканална котва.* Този вид котви е резултат на стремежа към намаляване на инерционния момент на ротора, за да се намали механичната времеkonстанта и да се увеличи бързодействието на двигателя.

В устройството на статора няма разлика спрямо обикновените постояннотоккови изпълнителни двигатели. Най-често възбуждането е с постоянни магнити. Особеното е в ротора (фиг. 12.16). Както показва името, котвата е гладка феромагнитна без канали. Тя е дълга и с малък диаметър, за да се намали инерционният момент. Намотката е закрепена направо върху гладката повърхност на ротора. Закрепването ѝ става с помощта на подходящо лепило и изолационен материал.

Този двигател освен малкия инерционен момент на котвата и съответно малката механична времеkonстанта има и малка електромагнитна времеkonстанта, тъй като намотката се намира изцяло във въздушната междина, а не в канали и има незначител-



Фиг. 12.16. Двигател с гладка котва
1 — статор с постоянни магнити, 2 — гладка котва, 3 — четков апарат; 4 — колектор



Фиг. 12.17. Двигател с куха магнитна котва

1 — колектор; 2 — четков апарат; 3 — статор с постоянни магнити; 4 — вътрешен статор; 5 — куха котва; 6 — втулка

на индуктивност (както при асинхронния двигател с кух немагнитен ротор). Така че във всяко отношение този двигател е по-бързодействащ от обикновения.

Понеже индуктивността на котвената намотка е много малка, комутацията на двигателя е добра — практически безискрова.

3. *Изпълнителен постояннотокков микродвигател с куха немагнитна котва.* По устройство наподобява асинхронния изпълнителен двигател с кух немагнитен ротор, но има и принципилни разлики.

Статорът му е като на обикновените постояннотоккови изпълнителни двигатели, най-често с постоянни магнити — фиг. 12.17. Котвата представлява куха тънкостенна (1—2 mm) изолационна чашка, закрепена на вала, в стените на която като арматура е пресована котвената намотка. По обикновения начин тя е свързана с колектора. За затваряне на магнитния поток има вътрешен статор във вид на плътен феромагнитен цилиндър от магнитно мек материал, който е закрепен на цилиндричен издатък (втулка) върху единия лагерен щит.

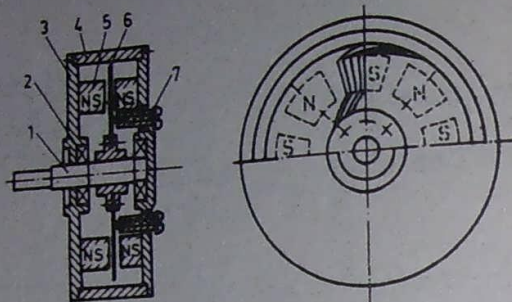
Котвата с такава конструкция няма стомана и е много лека. Това е основната цел — малка маса, малък инерционен момент и малка механична времеkonстанта.

Този двигател се смята за един от най-бързодействащите; времеkonстантата му е няколко милисекунди, а ъгловото му ускорение може да достигне до неколкостотин хиляди rad/s^2 .

4. *Изпълнителен постояннотокков микродвигател с печатна*

котва. Нарича се още двигател с печатна намотка или просто печатен двигател. Котвената му намотка е изработена по технологията на печатните платки.

Типична е дисковата конструкция на печатната котва (фиг. 12.18). Двигателят е плосък и къс, но с голям диаметър. Статор



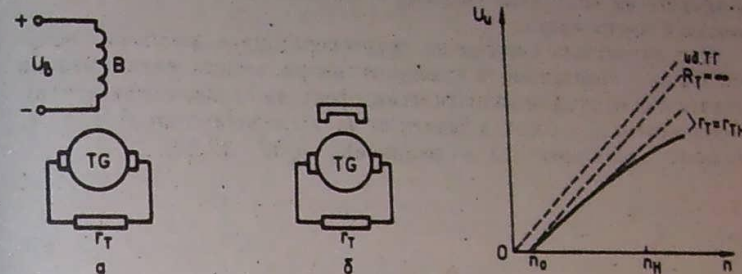
Фиг. 12.18. Двигател с печатна намотка
1 — вал; 2 — лагер; 3 — лагериен щит; 4 — тяло;
5 — постоянен магнит; 6 — печатна котва; 7 — четков апарат

рът е многополюсен с възбуждане от постоянни магнити, поставени аксиално. Във въздушната междина между тях се върти дискова печатна котва, закрепена на вала. Котвата е изработена във вид на тънък (1—2 mm), но здрав и лек изолационен диск, върху двете страни на който са зелепени печатните проводници. Един от начините за изработване на печатната намотка е да се използва двойно фолиран с мед стъклотекстолит. По фотохимичен начин се създават изолационните междини между проводниците, с което се оформя намотката. По външен вид печатната намотка прилича на чертеж на кръгова схема на котвена намотка. Тъй като намотката е двуслойна, единият слой се намира от едната страна на диска, а другият — от другата; проводниците от двата слоя се съединяват по периферията на диска и по вътрешния му кръг чрез спояване. Полусекциите се състоят от една права клиновидна част, която е активната част, и две извити по еволвента челни съединения. Отделен колектор няма; четките се трият направо по печатните проводници.

Двигателят има същите положителни и отрицателни качества както разгледаните двигатели. Инерционният момент на дисковата котва обаче е по-голям от инерционния момент на кухата цилиндрична котва, защото диаметърът му е по-голям.

1.2.6 Постояннотокови тахогенератори

Тахогенераторът е информационна микромашинна, която преобразува честотата на въртене в електрическо напрежение, пропорционално на нея.



Фиг. 12.19. Схема на постояннотоков тахогенератор

а — с електромагнитно възбуждане;
б — с възбуждане от постоянни магнити

Фиг. 12.20. Изходни характеристики на постояннотоков тахогенератор

По устройство постояннотоковият тахогенератор представлява генератор за постоянен ток с малка мощност. Четките са в неутралната линия, допълнителни полюси няма. Възбуждането е два вида — независимо електромагнитно възбуждане (фиг. 12.19 а) и възбуждане с постоянни магнити (магнитоелектрично) — (фиг. 12.19 б). Изходна намотка е котвената. Обикновено тахогенераторите са двуполусни (въобще всички постояннотокови микромашини са двуполусни).

Уравнението на изходната характеристика на тахогенератора се получава от зависимостите:

$$(12.18) \quad U_n = E_n - I_n r_n - 2\Delta U_c;$$

$$(12.19) \quad E_n = c_E n \Phi_n = c_E c_\Phi I_n l.$$

Като се има предвид, че $I_n = \frac{U_n}{r_n}$ и $I_n = \frac{U_n}{r_n}$, се намира

$$(12.20) \quad U_n = \frac{E_n - 2\Delta U_c}{1 + \frac{r_n}{r_T}} = \frac{c_E c_\Phi \frac{U_n}{r_n} l}{1 + \frac{r_n}{r_T}} n - \frac{2\Delta U_c}{1 + \frac{r_n}{r_T}} = c_1 n - c_2.$$

Ако магнитната система на тахогенератора е ненаситена, изходната характеристика е права линия — фиг. 12.20. Стръмността ѝ зависи от r_t . При $r_t \rightarrow 0$ $c_t \rightarrow 0$.

Вижда се, че поради пада на напрежение в четките ΔU_c характеристиката не започва от началото, а тахогенераторът започва да отдава напрежение при честота на въртене n_0 , по-голяма от нула. Тя определя една зона на нечувствителност или мъртва зона, в рамките на която тахогенераторът не генерира. Тази зона обикновено е много малка.

Ако магнитната система на тахогенератора е наситена, потокът Φ не е константен, а зависи от товара, защото реакцията на котвата има надлъжен размагнитващ ефект (вж. глава единадесета). Коефициентът $c_\Phi \neq \text{const}$, а зависи от I_a и следователно от n , т. е. реалната характеристика е нелинейна (фиг. 12.20).

Литература

1. Ангелов, А. Д. Димитров. Електрически машини. С., Техника, ч. I — 1976, ч. II — 1988.
2. Ангелов, А., С. Попадин, В. Динов. Електрически машини с малка мощност. С., Техника, 1962.
3. Божилов, Г. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически микромашини. С., Техника, 1977.
4. Буцев, В. Електромеханични устройства. С., Техника, 1986.
5. Ваклев, И., М. Стоянов. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически машини и апарати. С., Техника, 1985.
6. Динов, В. Електрически машини. С., Техника, 1977.
7. Динов, В., Д. Сотиров. Безконтактни двигатели за постоянен ток. С., Техника, 1981.
8. Личев, А. Електрически апарати и електротехнология. С., Техника, 1980.
9. Митев, Е., Г. Божилов. Електрически машини и апарати. С., Техника, 1980.
10. Пенчев, П. Електрически апарати. С., Техника, 1976.
11. Писарев, А. и др. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически апарати. С., Техника, 1976.
12. Попадин, С. Електрически микромашини. С., Техника, ч. I — 1970, ч. II — 1970, ч. III — 1975.
13. Попов, И. Електрически машини. С., Наука и изкуство, ч. I — 1954, ч. II — 1955, ч. III — 1975, ч. IV — 1958.
14. Петров, Т., В. Тодоров. Електромеханични устройства. Габрово, 1988.
15. Соколов, Е. Изследване и изпитване на електрически машини. С., Техника, 1977.
16. Трифонов, Н. Електромагнитни апарати за управление. С., Техника, 1982.
17. Трифонов, Н., М. Минчев, И. Бочева. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически апарати в автоматиката. С., Техника, 1976.
18. Тонев, И. Електротехника и електроника. С., Техника, 1988.
19. Фархи, С., С. Папазов. Теоретична електротехника. С., Техника, 1981.
20. Цанков, Й. Изпитване на електрически машини. С., Техника, 1972.
21. Арменский, Е., Г. Фалк. Электрические микромашины. М., Высшая школа, 1975.
22. Брускин, Д. и др. Электрические машины и микромашины. М., Высшая школа, 1971.
23. Бут, Д. Бесконтактные электрические машины. М., Высшая школа, 1985.
24. Важнов, А. Электрические машины. Л., Энергия, 1969.
25. Вольдек, А. Электрические машины. Л., Энергия, 1974.
26. Иванов — Смоленский. Электрические машины. М., Энергия, 1980.

27. Калыева, А., А. Мазур. Электрические машины. Минск, Высшая школа, 1971.
28. Копылов, И. Электрические машины. М., Энергоатомиздат, 1986.
29. Козулин, В., Л. Рожкова, Электрооборудование станций и подстанций. М., Энергоатомиздат, 1987.
30. Костенко, М., Л. Пиотровский. Электрические машины. М. — Л., Энергия, ч. I — 1964, ч. II — 1965.
31. Неклепаев, Б. Электрическая часть электростанций и подстанций. М., Энергоатомиздат, 1986.
32. Хрущев, В. Электрические микромашины. Л., Энергия, 1969.
33. Чунихин, А. Электрические аппараты. М., Энергия, 1975.
34. Юферов, Ф. Электрические машины автоматических устройств. М., Высшая школа, 1976.
35. Beyart, R. Les petits moteurs électriques. Paris, Dunod, 1958.
36. Dubicki, B. Maszyny elektryczne. Warszawa, PWN, 1964.
37. Latek, W. Zarys maszyn elektrycznych. Warszawa, WNT, 1974.
38. Muller, G. Elektrische maschinen. Berlin, VT, 1968.
39. Richter, R. Elektrische maschinen. Essen, VT, 1961.
40. Sliwinski, R. Kleine einphasen motoren. Berlin, VT, 1961.
41. Poloujadoff, M. Traitement de l'énergie électrique — conversion électromécanique. Paris, Dunod, 1972.
42. Dalmasso, G. Cours d'électrotechnique. Paris, Dunod, 1978.
43. Segulier, N. Electrotechnique industrielle. Paris, Dunod, 1968.

Съдържание

Глава I

Общи въпроси на електроенергетиката.	3
1.1. Производство на електрическа енергия.	3
1.2. Пренасяне, разпределение и потребление на електрическата енергия.	12

Глава II

Електрически контакт и електрическа дъга.	21
2.1. Общи сведения.	21
2.2. Явления в електрическия контакт. Контактни материали.	24
2.3. Електрическа дъга при постоянен и променлив ток.	26
2.4. Дъгогасителни устройства.	31

Глава III

Електромагнитни механизми.	34
3.1. Общи сведения.	34
3.2. Тягова сила на електромагнита.	35
3.3. Динамика на електромагнита.	39
3.4. Марки за изменение на времето на задействане на електромагнитите.	40

Глава IV

Електрически апарати за управление и защита.	42
4.1. Общи сведения.	42
4.2. Апарати с ръчно управление.	43
4.3. Апарати с автоматично управление.	48
4.4. Апарати за защита и сигнализация.	52

Глава V

Трансформатори.	62
5.1. Общи сведения.	62
5.2. Основни уравнения на еднофазен трансформатор.	66
5.3. Заместващи схеми на трансформатора.	72
5.4. Векторни диаграми на трансформатора.	75
5.5. Празен ход на трансформатора.	77
5.6. Късо съединение на трансформатора.	78
5.7. Изменение на напрежението и външна характеристика на трансформатора.	79
5.8. Загуби и коефициент на полезно действие на трансформатора.	81
5.9. Трифазни трансформатори.	82
5.10. Специални трансформатори.	83

Глава VI
Общи въпроси на електрическите машини. 88

- 6.1. Общи сведения за електрическите машини. 88
- 6.2. Намотки на променливотоковите машини. 92
- 6.3. Електродвижещи напрежения на променливотоковите намотки. 98
- 6.4. Магнитодвижещи напрежения на променливотоковите намотки. 103

Глава VII
Асинхронни двигатели. 114

- 7.1. Предназначение и област на приложение. Устройство. 114
- 7.2. Принцип на работа на трифазния асинхронен двигател. 118
- 7.3. Процеси при работа на асинхронния двигател и тяхното математическо описание. 123
- 7.4. Характеристики на асинхронния двигател. 138
- 7.5. Пускане на асинхронните двигатели. 143
- 7.6. Регулиране на честотата на въртене. 150

Глава VIII
Асинхронни микромашини. 157

- 8.1. Еднофазни асинхронни микродвигатели за обща употреба. 157
- 8.2. Изпълнителни асинхронни микродвигатели. 167
- 8.3. Завъртащи се трансформатори. 179
- 8.4. Селсини. 182

Глава IX
Синхронни машини. 188

- 9.1. Устройство, принцип на действие и области на приложение. 188
- 9.2. Реакция на котвата на синхронен генератор. 191
- 9.3. Уравнения и векторни диаграми на синхронния генератор. 194
- 9.4. Характеристики на синхронния генератор. 198
- 9.5. Включване на синхронните генератори в паралелна работа. 200
- 9.6. Паралелна работа на синхронната машина. 203
- 9.7. Ъглови характеристики на синхронната машина. 206
- 9.8. Устойчивост на синхронната машина. 209
- 9.9. Синхронни двигатели с електромагнитно възбуждане. 211

Глава X
Синхронни микродвигатели. 214

- 10.1. Магнитоелектрични синхронни двигатели. 214
- 10.2. Синхронни реактивни двигатели. 217
- 10.3. Синхронни хистерезисни двигатели. 219
- 10.4. Стъпкови двигатели. 223

Глава XI
Машини за постоянен ток. 231

- 11.1. Област на приложение. Устройство. 231
- 11.2. Принцип на действие. Уравнения. 237
- 11.3. Магнитно поле при натоварване. Комутация. 243
- 11.4. Общи сведения за постояннотоковите двигатели. 249
- 11.5. Пускане и регулиране на постояннотоковите двигатели. 252
- 11.6. Постояннотокови генератори. 261

Глава XII

Постояннотокови микромашини. 266

- 12.1. Постояннотокови микродвигатели за обща употреба. 266
- 12.2. Универсални колекторни двигатели. 269
- 12.3. Безколекторни постояннотокови микродвигатели. 273
- 12.4. Изпълнителни постояннотокови двигатели. 276
- 12.5. Видове изпълнителни постояннотокови микродвигатели. 282
- 12.6. Постояннотокови тахогенератори. 285

Литература. 267