

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 и неуправляеми токоизправители в повечето области на индустрията. Много голямо приложение имат двигателите за постоянен ток. Причина за това е, че в сравнение с другите типове електрически машини те притежават подобри свойства за плавно регулиране на скоростта на въртене в широки граници. Затова преобладаващата част регулируеми електрозадвижвания 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. Неговата 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, трамваи, тролейбуси, метро), в металургията (прокатни двигатели, ролгангови двигатели, кранови двигатели и др.), в машиностроенето за главни и подавателни задвижвания 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 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 различни номинални данни. Например мощността варира от няколко вата (при микродвигате-

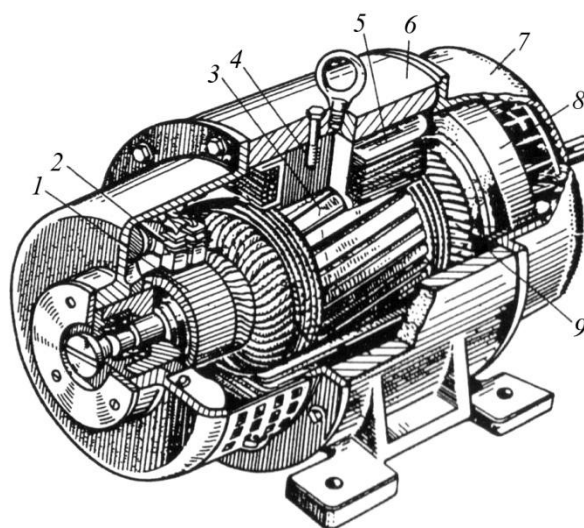
лите) до около 20 MW при някои крупни двигатели. Номиналното напрежение на двигателите с общо предназначение с малка и средна мощност е 220 V. Номиналното напрежение на крупните двигатели достига до 1000 V. Напрежението на двигателите за електрокари, стартерите и динамата е ниско, тъй като е равно на напрежението на акумулатора. Номиналната скорост на въртене е най-различна – от няколко десетки до няколко хиляди обороти в минута. У нас са произвеждани различни типове постояннотокови двигатели: тягови и спомагателни двигатели за електрокари, трамвайни двигатели, високомоментни двигатели за металорежещи машини с ЦПУ, изпълнителни двигатели за периферни устройства 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 се увеличава стойността на електрозадвижването. Поради това в регулируемите задвижвания се използват предимно колекторни двигатели. В някои задвижвания (например в компютрите) двигателите са безконтактни.

Устройството на машина за постоянен ток е показано на фиг. 11.1. *Статорното тяло б* 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 болтове 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. Листовете са изолирани един от друг, за да се намалят загубите от вихрови токове, които се получават вследствие на цикличното пренамагнитване на котвата при въртенето ѝ в магнитното поле на полюсите. Листовете 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.

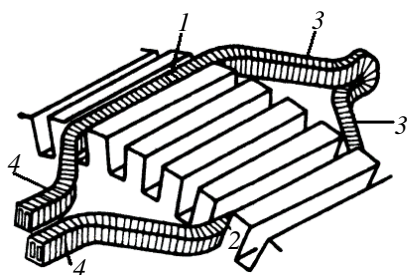
Котвената намотка 9 се състои от секции, изпълнени от изолирани медни проводници. Страните на секциите са изолирани и укрепени в каналите на котвата. Краищата на секциите са запоени към пластините на колектора 1. Колекторните пластини са изработени от мед. Те са изолирани помежду си и от останалите части на ротора. Върху външната цилиндрична повърхност на колектора се трият четките 2, които се изработват от пресована графитна смес. Чрез колектора и четките въртящата се котвена намотка се свързва с външната мрежа.



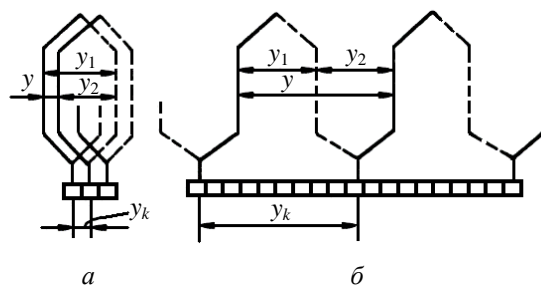
Фиг. 11.1. Устройство на електрическа машина за постоянен ток

1 – колектор; 2 – четки; 3 – пакет на котвата; 4 – главен полюс; 5 – възбудителна намотка; 6 – статорно тяло; 7 – лагерен щит; 8 – вентилатор; 9 – котвена намотка

Котвените намотки на постояннотоковите машини са **д в у с л о й н и**. 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 пълтна линия, а в долния слой – с прекъсната линия.



Фиг. 11.2. Разположение на секцията в каналите на котвата: 1 и 2 – горна и долна активна страна; 3 и 4 – челни съединения



Фиг. 11.3. Свързване на секциите на листова (а) и вълнова (б) намотка

При съставяне на схемите на котвените намотки и изучаване на явленията в тях се използват разгънати схеми. В тези схеми цилиндричните повърхности на котвата и колектора заедно с намотката се разгъват в плоскостта на чертежа.

В зависимост от начина на свързване на секциите една с друга и с колекторните пластини се различават два основни вида котвени намотки: *листова* (фиг. 11.3а) и *вълнова* (фиг. 11.3б). При двата вида намотки секциите са свързани 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 се състави схемата, най-напред се изчисляват 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

$$(11.1) \quad y_1 = \tau = \frac{S}{2p}.$$

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 .

Резултатната 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

$$(11.2) \quad y = y_k = 1.$$

При простата вълнова намотка резултатната стъпка и стъпката по колектора се определят по формулата

$$(11.3) \quad y = y_k = \frac{K-1}{p}.$$

На фиг. 11.4 е дадена разгънатата схема на проста листова намотка със

$$S = K = 16; 2p = 4; y_1 = \frac{S}{2p} = \frac{16}{4} = 4; y = y_k = 1.$$

следните данни:

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 съставянето на схемата се започва от първа колекторна пластина, която се свързва със страната I . След това, за да се очертае първата секция, страната I се свързва чрез челно съединение със страната 5 , намираща се в долния слой (прекъснатата линия). Номерът $ú$ 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). По такъв начин всички секции на котвената намотка са свързани последователно. В разгънатите схеми секциите се чертаят като еднонавивкови, независимо от действителния брой на навивките им.

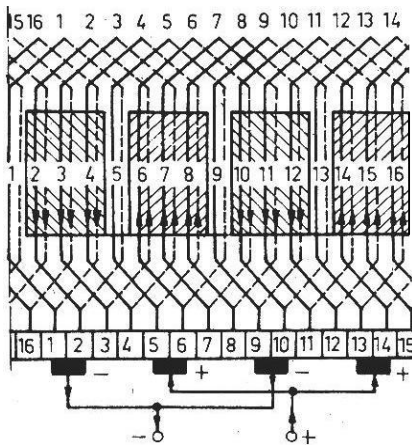
Четките са разположени срещу осите на полюсите. На фиг. 11.4 те съединяват накъсо колекторните пластини на секциите с номера 1, 5, 9 и 13. Активните страни на тези секции се намират точно между съседните полюси. Броят на четките е равен на броя на полюсите $2p$, а полярността им се редува. Едноименните четки са свързани помежду си и образуват положителния и отрицателния извод на котвата.

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)

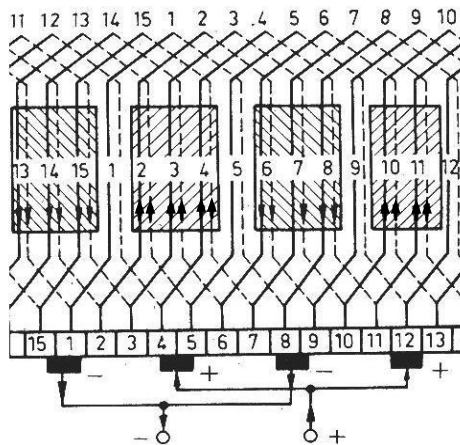
$$y_1 = \frac{15}{4} = 3,75,$$

се закръглява на най-близкото цяло число $y_1 = 4$. Резултантната стъпка и стъпката по колектора се определят по (11.3)

$$y = y_k = \frac{15-1}{2} = 7.$$



Фиг. 11.4. Схема на проста листова намотка с $S = K = 16$; $2p = 4$; $y = y_k = 1$



Фиг. 11.5. Схема на проста вълнова намотка с $S = K = 15$; $2p = 4$; $y = y_k = 7$

Първата секция има формата, показана на фиг. 11.3б. Страните на тази секция 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 срещу осите на полюсите. Едноименните четки и връзките между тях свързват накъсо секциите с номера 1, 5, 9 и 12. Активните страни на тези секции се намират в зоните между съседните полюси.

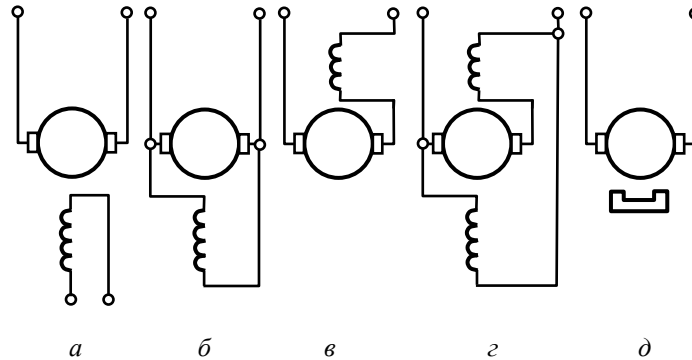
От анализа на прости листови и прости вълнови намотки с различен брой на секциите и на полюсите се установява следното. Формата на секциите при двата вида намотки е еднаква. Различен е начинът, по който се свързват изводите на секциите към колектора (виж фиг. 11.3). Броят на паралелните клонове на двата вида намотки е различен. Простата вълнова намотка има винаги само два паралелни клона ($2a = 2$). Броят на паралелните клонове на простата листовата намотка е равен на броя на полюсите ($2a = 2p$). При проектирането на постоянно-токовите 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 се различават следните видове двигатели за постоянен ток:

1. С независимо възбуждане (фиг. 11.6а). Котвената и възбудителната намотка са включени към два независими източника на постоянно напрежение.
2. С паралелно възбуждане (фиг. 11.6б). Веригите на котвената и възбудителната намотка са включени паралелно към един и същи източник на напрежение.
3. С последователно възбуждане (фиг. 11.6в). Веригите на котвената и възбудителната намотка са свързани последователно.
4. Със смесено възбуждане (фиг. 11.6г). Върху главните полюси са поставени две отделни възбудителни намотки. Едната се включва последователно, а другата – паралелно на котвената верига.

5. С възбуждане от постоянни магнити (фиг. 11.6д). 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.



Фиг. 11.6. Видове възбудителни системи на машини за постоянен ток

11.2. Принцип на действие. Уравнения

При машините за постоянен ток обикновено *индукторът* е в *статора*, а *котвата* – в *ротора*. Затова постоянният магнитен поток, създаден от главните полюси, не променя положението си в пространството. Котвата се върти спрямо този неподвижен магнитен поток със скорост на въртене n . Скоростта на въртене се изразява в обороти за минута (min^{-1}).

На фиг. 11.7 е показан напречен разрез на двуполусен ($2p = 2$) постояннотоков двигател. С прекъснати линии са означени магнитните линии на потока, възбуден от главните полюси (потокът на разсейване не е показан). Магнитната верига за потока на главните полюси се състои от тялото и полюсите на статора, зъбите и ярема на ротора и въздушната междина.

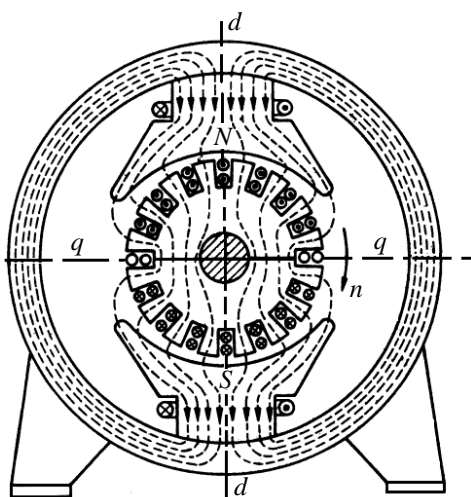
На същата фигура е означена посоката на тока в проводниците на котвената намотка. При малък ток в котвата, например при празен ход на двигателя, картината на магнитното поле практически не се променя. Тя е симетрична спрямо оста на полюсите d . Напречната ос q преминава точно по средата между два съседни 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 про-

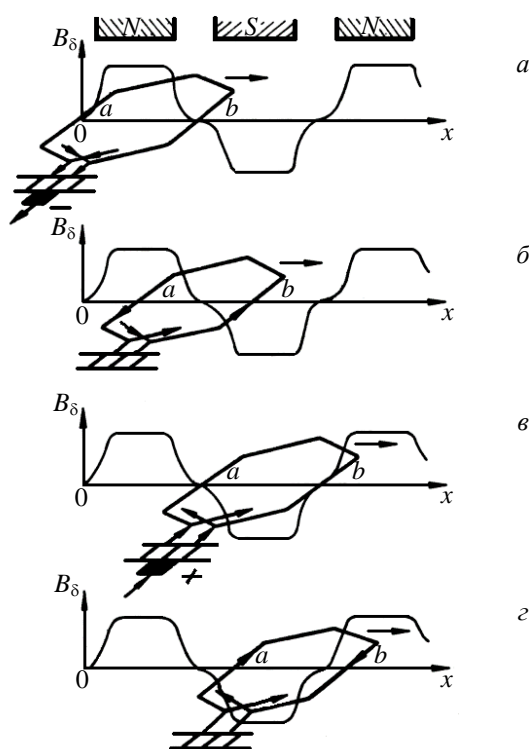
тивен случай не е възможно да се осъществи електромеханичното преобразуване на енергията. При въртенето на котвата страната на секцията попада под полюс с обратна полярност след преминаването през геометричната неутрална линия – следователно тук трябва да се смени посоката на тока в нея. Промяната на 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

$$(11.4) \quad f = \frac{pn}{60},$$

където P е броят на чифтовете полюси, а n е скоростта на въртене [min^{-1}].



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

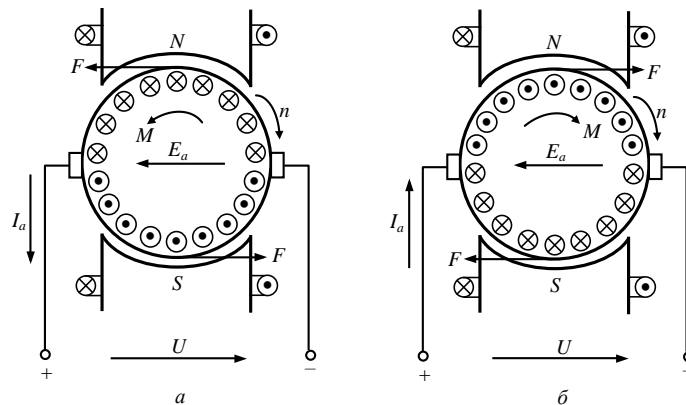
Процесът може да се изучи по-детайлно, като се разгледат няколко последователни положения на една и съща секция на котвената намотка спрямо полюсите и четките (фиг. 11.8). Приема се, че секцията е с диаметрална стъпка $y_1 = \tau$. Кривата на магнитната индукция във въздушната междина $B_\delta(x)$ е представена във функция 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 неут-

рални линии (фиг. 11.8а), в секцията не се индутира е.д.н., тъй като магнитната индукция е равна на нула. В същия момент токът в секцията е нула (виж също секция №1 на фиг. 11.4).

При следващото положение на секцията (фиг. 11.8б) активните страни се намират под полюсите. Токът в секцията се затваря през веригата на съседните секции вляво и вдясно от разглежданата секция (сравни със секция №3 от фиг. 11.4). Когато активните страни попаднат отново в геометричните неутрални линии (фиг. 11.8в), токът в секцията се анулира, а краищата ѝ са съединени на късо от положителната четка (виж секция №5 на фиг. 11.4). На фиг. 11.8г секцията вече е преминала под следващата двойка полюси. Посоката на тока в секцията е обратна на тази от фиг. 11.8б. Обаче посоката на тока в активните страни *a* и *b* съответства на полярността на полюсите. Така електромагнитната сила е насочена по 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. 11.9а е представен схематично двуполусен генератор за постоянен ток. Котвата му се върти в показаната посока със скорост на въртене *n*. В генератора се извършва преобразуване на механичната енергия в електрическа, следователно котвата трябва да се задвижва от двигател. При зададената полярност на главните полюси посоката на индутираното е.д.н. в котвената намотка се определя чрез правилото на дясната ръка. Ако външната верига е затворена с колектора и четките, през нея протича ток I_a . Посоките на е.д.н. E_a и тока I_a в котвената намотка съвпадат. Токът I_a предизвиква пад на напрежение в съпротивлението на котвената намотка r_a . В това съпротивление е включено и переходното контактно съпротивление между колектора и четките.



Фиг. 11.9. Посока на е.д.н., тока, електромагнитната сила и електромагнитния момент в постояннотоков генератор (а) и двигател (б)

Напрежението на изводите U ще бъде по-малко от индукираното 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. 11.9а се вижда, че електромагнитният момент на генератора M е насочен срещу посоката на въртене. Моментът на двигателя $M_{\text{дв}}$, който задвижва генератора, действа по посоката на въртене. Спрямо този момент *електромагнитният момент на генератора е съпротивителен*. При установена работа ($n = \text{const}$)

$$(11.6) \quad M = M_{\text{дв}} .$$

На фиг. 11.9б е представен схематично д в и г а т е л за постоянен ток. Приема се, че посоката на въртене на котвата и полярността на полюсите са същите както при разгледания генератор. Следователно посоката на индукираното 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 на тока в генератора. Посоките на е.д.н. E_a и тока I_a в проводниците на котвата са п р о т и в о п о л о ж н и . Приложеното напрежение U се уравнива от е.д.н. E_a и пада на напрежение в съпротивлението

$$(11.7) \quad U = E_a + r_a I_a .$$

При установена работа електромагнитният момент на двигателя M е равен и противоположен 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 $U > E_a$.

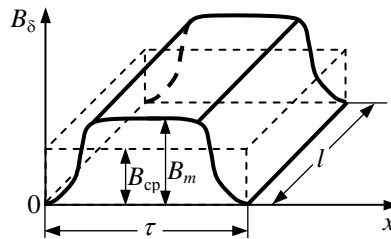
С помощта на фиг. 11.9 могат да бъдат направени следните изводи. Поляритетът на котвата на постояннотоковия генератор се променя при промяна на посоката на въртене или на посоката на тока във възбудителната намотка. Посока на въртене на постояннотоковия двигател може да се промени чрез смяна на поляритета на котвеното напрежение или чрез обръщане на посоката на тока във възбудителната намотка.

Електродвижещо напрежение в котвената намотка и електромагнитен момент. Пакетите на котвата и на 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. Полусното деление, изразено чрез диаметъра на котвата D , е

$$(11.9) \quad \tau = \frac{\pi D}{2p}$$



Фиг. 11.10. Разпределение на магнитната индукция във въздушната междина за един полюс

Магнитният поток във въздушната междина за едно полюсно деление е

$$(11.10) \quad \Phi = \int_s B_\delta ds = l \int_0^\tau B_\delta(x) dx.$$

Потокът може да се определи 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

$$(11.12) \quad v = \frac{\pi D n}{60}.$$

Е.д.н., индуктирано в един проводник на котвата, се определя от (6.1)

$$(11.13) \quad E_{cp} = lvB_{cp} = 2p l \tau \frac{n}{60} B_{cp} = 2p \frac{n}{60} \Phi.$$

Котвената намотка на постояннотоковата машина се състои от N проводника, свързани последователно и има $2a$ паралелни клона. Във всеки паралелен клон са свързани последователно $\frac{N}{2a}$ проводници. Е.д.н. на паралелния клон е равно на е.д.н. между две четки с различна полярност. То представлява и електродвижещото напрежение на котвената намотка

$$(11.14) \quad E_a = \frac{N}{2a} E_{\text{cp}} = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} \Phi.$$

За дадена машина величината

$$c_E = \frac{pN}{60a}$$

е постоянна. Тогава

$$(11.15) \quad E_a = c_E n \Phi.$$

Е.д.н. на котвената намотка E_a е пропорционално на скоростта на въртене n и на магнитния поток Φ .

Електромагнитният момент се образува от взаимодействието на тока в котвата и магнитния поток. Той може да се изрази чрез електромагнитната мощност P_δ и ъгловата скорост на ротора Ω

$$(11.16) \quad M = \frac{P_\delta}{\Omega}.$$

Тъй като $P_\delta = E_a I_a$ и след като се замести E_a от (11.14), получава се:

$$(11.17) \quad M = \frac{1}{2\pi} \frac{pN}{a} I_a \Phi;$$

$$(11.18) \quad M = c_M I_a \Phi.$$

Електромагнитният момент е пропорционален на тока в котвата I_a и на магнитния поток Φ .

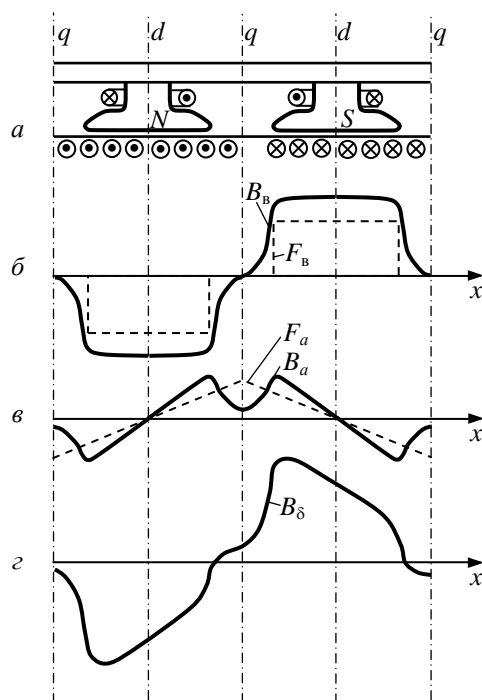
От разгледания принцип на действие на постоянноотоквата машина следва, че посоката на е.д.н. и на тока в котвената намотка периодично се променя, а във външната верига същите величини не се променят във времето. Това преобразуване се извършва чрез колекторно-четковия апарат. При генераторите той изпълнява ролята на механичен токоизправител, а при двигателите – на механичен инвертор.

11.3. Магнитно поле при натоварване. Комутация

При направените до тук изводи беше прието, че магнитното поле на котвения ток не оказва влияние върху полето, възбудено от главните полюси. Това влияние не може да се пренебрегне при натоварване на постоянноотоквите машини. Магнитното поле на тока в котвата се нарича *реакция на котвата*.

На фиг. 11.11а е показан в разгънат вид двигателят от фиг. 11.7. На фиг. 11.11б с прекъсната линия е начертано м.д.н. на възбудителната намотка F_B и с плътна линия – магнитната индукция във въздушната междина B_B на полето на главните полюси. Кривата на индукцията е симетрична спрямо осите d и има

стойност нула в геометричните неутрални линии q . Такова е магнитното поле при празен ход на двигателя.



Фиг. 11.11. Магнитно поле във въздушната междина при натоварване

М.д.н. на тока в котвата F_a е линейна функция на x (фиг. 11.11в). Тъй като четките са разположени в геометричните неутрални линии q , м.д.н. има максимална стойност по същите оси. По осите на полюсите d м.д.н. на реакцията на котвата 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.

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 съседните полюси. В тази зона магнитната проводимост е много по-малка от магнитната проводимост под полюсите. В резултат в кривата $B_a(x)$ се появяват седловини, които намаляват

стойностите на магнитната индукция B_a по осите q , въпреки че там F_a има максимална стойност (фиг. 11.11e).

Двете магнитни полета (на главните полюси и реакцията на котвата) се наслагват и образуват резултатно магнитно поле във въздушната междина при натоварване. Когато магнитната верига на машината е ненаситена, кривата на магнитната индукция $B_\delta(x)$ на резултатното поле може да бъде получена чрез сумиране на кривите $B_b(x)$ и $B_a(x)$ – фиг. 11.11z. 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_δ се разпределя неравномерно спрямо оста на полюсите. Кривата на индукцията се изкривява – в единия край на полюса индукцията се увеличава, а в другия край тя се намалява сравнение с тази при празен ход. В геометричната неутрална линия магнитната индукция е отлична от нула поради реакцията на котвата (фиг. 11.11z). Следователно в секциите, дадени накъсо от четките, ще се индукира е.д.н. при преминаването на активните им страни през геометричната неутрална линия q . Описаните явления оказват влияние върху комутацията на машината.

Комутация. При въртенето на котвата посоката на тока в секциите се променя периодично. Този процес се осъществява чрез 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 $+I_c$ с 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 става за много кратко време. Промяната на тока е причина за индукирането на е.д.н. в комутиращата секция.

При въртене на колектора със скорост v_k колекторната пластина изминава за време T_k път, равен на широчината на четката b_q , откъдето

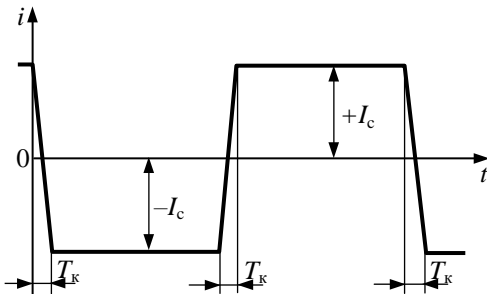
$$(11.20) \quad T_k = \frac{b_q}{v_k}.$$

За проста листова намотка ($y_k = 1$), като се има предвид, че $b_k = \frac{\pi D_k}{K}$ и $v_k = \frac{\pi D_k n}{60}$ (фиг. 11.13), от (11.20) се получава

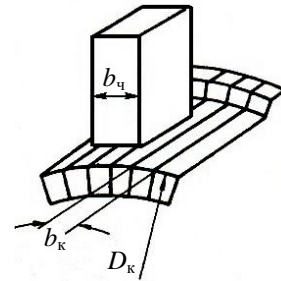
$$(11.21) \quad T_k = \frac{60\beta_k}{Kn},$$

където

$$\beta_k = \frac{b_q}{b_k} > 1.$$



Фиг. 11.12. Изменение на тока в секциите при въртенето на котвата



Фиг. 11.13. Определяне на периода на комутация

Процесът на комутация зависи от много голям брой фактори и затова не е възможно да се получи достатъчно точно аналитично решение за функцията на 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. $\sum e$.

Ако $\sum e = 0$, 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 общия случай $\sum e \neq 0$. В комутиращата секция се индуктират е.д.н. на собствена и взаимна индукция, както и е.д.н. на въртене от външното поле 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.

$$(11.22) \quad e_r = e_L + e_M$$

се нарича *реактивно е.д.н.* в комутиращата секция. Съгласно принципа на Ленц реактивното 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

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{\text{cp}} = -\frac{2I_c}{T_k}.$$

Тогава средната стойност на реактивното е.д.н. за периода на комутация е

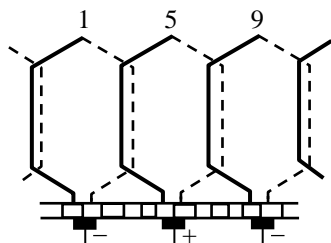
$$(11.23) \quad e_{\text{рсп}} = (L + 2M) \frac{2I_c}{T_k}.$$

Последното уравнение показва, че реактивното е.д.н. е пропорционално на коефициентите на собствена и взаимна индуктивност и на тока в котвата – виж (11.19), т.е. на степента на натоварване на машината, и обратно пропорционално на периода на комутация.

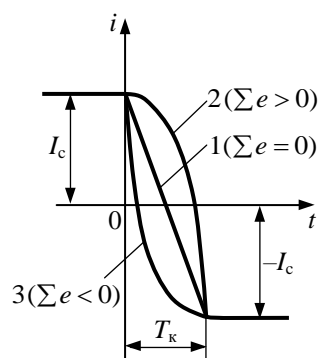
От фиг. 11.11г следва, че при натоварване вследствие на реакцията на котвата магнитното поле в неутралните линии има индукция B_{aq} , отлична от нула. При преминаване на активните страни през неутралните линии в комутиращата секция се индуцира е.д.н., чиято големина съгласно (6.1) е

$$(11.24) \quad e_{aq} = 2w_c v l B_{aq},$$

където w_c е броят на навивките в секцията.



Фиг. 11.14. Индуциране на е.д.н. на само индукция и взаимна индукция в комутиращата секция



Фиг. 11.15. Праволинейна (1), забавена (2) и ускорена (3) комутация

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 влошава работата на плъзгащия контакт. Налага се в секцията да се индукира 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

$$(11.25) \quad e_k = 2w_c v l B_k.$$

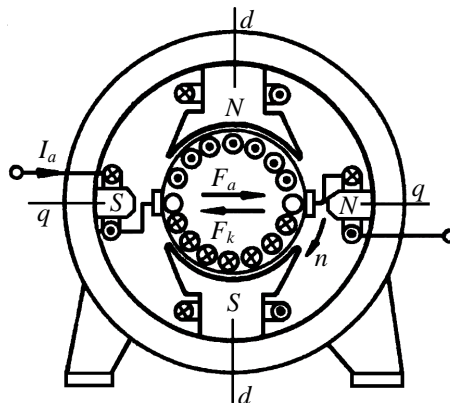
Сумарното е.д.н. в комутиращата секция е

$$(11.26) \quad \sum e = e_r + e_{aq} - e_k.$$

То определя закона на изменение на тока в комутиращите секции и вида на комутацията (фиг. 11.15). При $\sum e = 0$ 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**.

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 малко да прекомпенсира e_r и e_{aq} .

Съвременните машини за постоянен ток са снабдени с допълнителни полюси за подобряване на комутацията. Те създават магнитното поле, което индукира в комутиращите секции е.д.н. e_k . Затова допълнителните полюси са разположени в геометричните неутрални линии q (фиг. 11.16).



Фиг. 11.16. Разположение и полярност на допълнителните полюси в двигател за постоянен ток

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 . Посоките на тези м.д.н. се определят с помощта на правилото на десния винт.

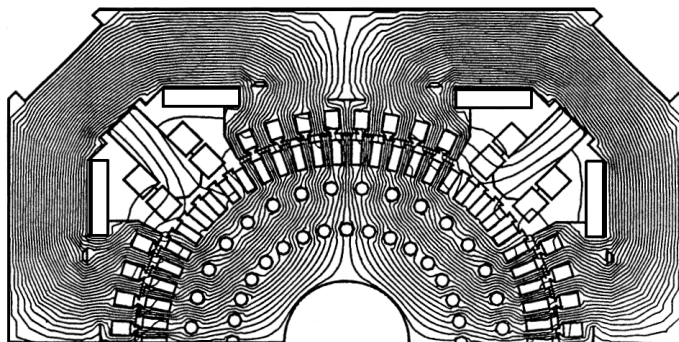
Реактивното е.д.н. e_r и е.д.н. от реакцията на котвата e_{aq} са пропорционални на котвения ток I_a и на скоростта на въртене на котвата n . За да се получи компенсация чрез e_k , индуктирано от полето на допълнителните полюси, трябва да се изпълнят две условия. Първото условие е: м.д.н. да бъде пропорционално 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 I_a и скоростта на въртене n).

Горните изводи се отнасят за положение на четките, при което комутират секциите, чиито активните страни преминават през геометричните неутрални линии. Това е задължително за машините с допълнителни полюси и за двигателите, при които се променя посоката на въртене (реверсивните двигатели).

Постояннотоковите машини с голяма мощност се изпълняват с допълнителни полюси и компенсационна намотка, за да се подобри комутацията им. Компенсационната намотка е поместена в канали, шанцовани в полюсните накрайници. Тя е свързана последователно във веригата на котвата. Посоките на тока в компенсационната и котвената намотка са противоположни. По такъв начин се получава компенсация на реакцията на котвата при всички режими на натоварване.

На фиг. 11.17 е представена картината на магнитното поле на четириполюсен двигател за постоянен ток при номинално натоварване (800 kW , 1500 min^{-1}).

Тя е моделирана с метода на крайните елементи. Изследването подпомага проектирането на допълнителните полюси и компенсационната намотка.



Фиг. 11.17. Картина на магнитното поле в постояннотоков двигател при натоварване

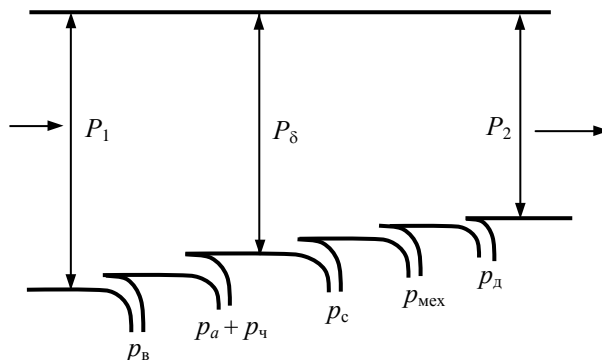
Искренето между колектора и четките се дължи на електромагнитни и механични причини. Първите са свързани с електромагнитните явления на комутационния процес. Когато колекторните пластини излизат изпод четките, електрическата верига се прекъсва и възникват краткотрайни електрически дъги. Искренето по 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 комутацията 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 комутацията.

11.4. Общи сведения за постояннотоковите двигатели

Преобразуването на електрическата енергия в механична от двигателите за постоянен ток е съпроводено със загуби на мощност. Енергийният баланс е изобразен чрез диаграмата на фиг. 11.18. Механичната мощност на вала на двигателя P_2 се получава, като от консумираната от мрежата електрическа мощност P_1 , се извадят общите загуби $\sum p$

$$(11.27) \quad P_2 = P_1 - \sum p.$$



Фиг. 11.18. Диаграма на мощностите и загубите на двигател с паралелно възбуждане

Общите загуби в двигателя са

$$(11.28) \quad \sum p = p_{\text{в}} + p_a + p_{\text{ч}} + p_c + p_{\text{мех}} + p_{\text{д}},$$

където $p_a = r_a I_a^2$ са електрическите загуби в котвената верига;

$p_{\text{в}} = r_{\text{в}} I_{\text{в}}^2$ – електрическите загуби във възбудителната намотка;

$p_{\text{ч}} = 2\Delta U_{\text{ч}} I_a$ – 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;

$p_{\text{д}}$ – допълнителните загуби;

r_a – съпротивлението на всички намотки, свързани последователно в котвената верига;

$r_{\text{в}}$ – съпротивлението на възбудителната намотка;

$\Delta U_{\text{ч}}$ – падът на напрежението в една четка.

К.п.д. на двигателя се изчислява по формулата

$$(11.29) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1},$$

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 скорост на въртене 1500 min^{-1} и номинална мощност 200 kW има к.п.д. 92 %, а двигател с номинална мощност 11 kW и същата скорост на въртене има к.п.д. 86 %.

Начинът на възбуждане на постоянноотоките двигатели оказва съществено влияние върху техните свойства, област на приложение и методи за регули-

ране. 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 уравненията на двигателя (11.7), (11.15) и (11.18):

$$\begin{aligned} U &= E_a + r_a I_a; \\ E_a &= c_E n \Phi; \\ M &= c_M I_a \Phi. \end{aligned}$$

След като се замести E_a от второто уравнение в първото, получава се

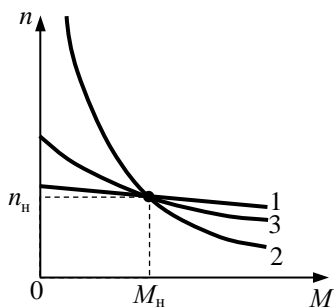
$$(11.30) \quad n = \frac{U - r_a I_a}{c_E \Phi}.$$

От третото уравнение се изразява I_a и се замества в (11.30), откъдето

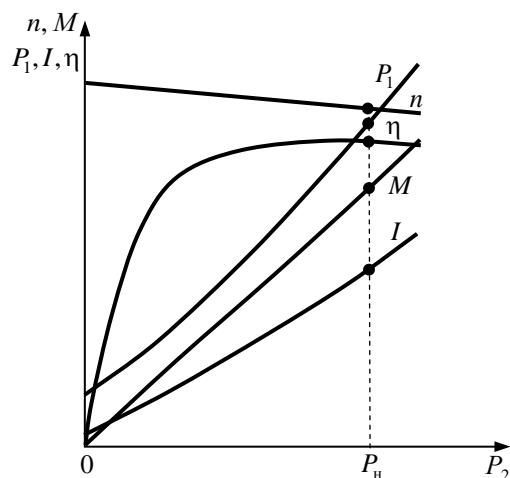
$$(11.31) \quad n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{r_a M}{c_E c_M \Phi^2}.$$

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 скоростта на въртене.

При $U = U_n = \text{const}$ от (11.31) се получава *естествената* механична характеристика. На фиг. 11.19 са сравнени естествените механични характеристики на двигатели с паралелно, последователно и смесено възбуждане. Механичната характеристика на двигателите с независимо и паралелно възбуждане е твърда – скоростта на въртене се намалява малко при увеличаване на натоварването. Двигателите с последователно възбуждане са подходящи за транспортни средства. При тяхната механична характеристика двигателният момент M нараства с намаляване на скоростта на въртене n . Двигателите със смесено възбуждане при съпосочно свързване на възбудителните намотки имат междинни свойства, които зависят от преобладаващото действие на паралелната или последователната възбудителна намотка.



Фиг. 11.19. Механични характеристики на двигатели с паралелно (1), последователно (2) и смесено възбуждане при съпосочно свързване (3)



Фиг. 11.20. Работни характеристики на двигател с паралелно възбуждане

Работните свойства на двигателите за постоянен ток се определят и от работните характеристики. Работните характеристики представляват зависимости на скоростта 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. 11.20 са представени работните характеристики на двигател с паралелно възбуждане. Техният вид е подобен на работните характеристики на асинхронния двигател.

11.5. Пускане и регулиране на постояннотоките двигатели

При пускане на двигателите не трябва да се получи недопустимо голям пусков ток $I_{ап}$, опасен за котвената намотка и колекторно-четковия апарат. Ограниченията 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

$$(11.33) \quad I_{ап} = \frac{U}{r_a + R_p}.$$

След развъртането на ротора скоростта на въртене n и е.д.н. E_a нарастват, а токът I_a намалява. Необходимо е пусковият резистор 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 $I_{ан} = (4 \div 6)I_{ан}$. При двигателите със средна мощност е необходимо да се ограничи пусковият ток до $I_{ан} = (1,5 \div 2)I_{ан}$. При голяма мощност пусковият ток не трябва да надвишава номиналния ток в котвата $I_{ан}$.

Стойността на пусковия момент се определя от (11.31) за $n = 0$

$$(11.34) \quad M_{п} = \frac{c_M U \Phi}{r_a + R_p} = c_M I_{ан} \Phi.$$

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. 11.21 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.

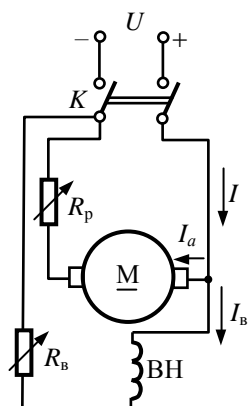
Уравнението на механичната характеристика (11.31) може да се запише в един и същи вид за двигателите с независимо и паралелно възбуждане и за двигателите с възбуждане от постоянни магнити

$$(11.35) \quad n = n_0 - kM,$$

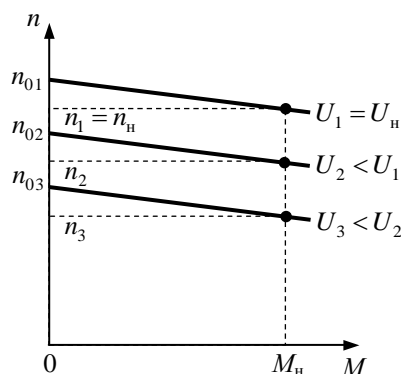
където

$$(11.36) \quad n_0 = \frac{U}{c_E \Phi};$$

$$k = \frac{r_a}{c_E c_M \Phi^2}.$$



Фиг. 11.21. Схема на свързване на двигател с паралелно възбуждане



Фиг. 11.22. Механични характеристики на двигатели с паралелно или независимо възбуждане при различно напрежение на котвата

Ако $U = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$, (11.35) е уравнение на права линия. При празен ход на двигателя ($M = 0$) скоростта на въртене е n_0 . Номиналната скорост на въртене n_n е малко по-малка от n_0 . При различни напрежения се получават различни стойности на скоростта на въртене при празен ход и натоварване.

На фиг. 11.22 са показани механичните характеристики на един двигател, чиято котва е захранена с различни напрежения. Това е семейство прави линии, успоредни на *естествената характеристика*. По такъв начин чрез регулиране на напрежението на котвата се регулира скоростта на въртене под номиналната скорост (котвено управление). Това регулиране е без загуби на енергия.

Регулирането на скоростта на въртене над номиналната се извършва без загуби чрез намаляване на потока Φ при $U = U_n = \text{const}$ (полюсно управление). Анализът на (11.35) и (11.36) доказва възможността за регулиране чрез отслабване на магнитното поле. Допустимата максимална скорост е ограничена по механични причини. При двигателите с независимо и паралелно възбуждане магнитният поток Φ се намалява чрез намаляване на тока във възбудителната намотка. Този вид регулиране не може да се реализира при двигателите с възбуждане от постоянни магнити.

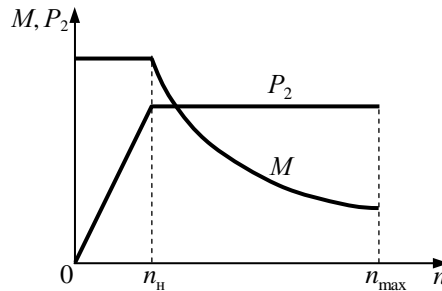
Голям брой различни работни машини и съответните регулируеми електрозадвижвания изискват показаните на фиг. 11.23 закони на регулиране. Скоростта на въртене се изменя в две зони, които съответстват на разгледаните по-горе методи. В първата зона при $n \leq n_n$ регулирането е при $M = \text{const}$. То става чрез изменение на напрежението на котвата и постоянен възбудителен ток $I_B = I_{BH} = \text{const}$. В тази зона мощността е линейна функция на скоростта на въртене.

Във втората зона $n_{\text{max}} \geq n \geq n_n$ мощността е постоянна ($P_2 = \text{const}$).

При това условие моментът

$$M = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{60}{2\pi n} P_2$$

се изменя по хипербола в зависимост от n . В тази зона котвеното напрежение остава постоянно, а скоростта на въртене се повишава чрез намаляване на възбудителния ток.



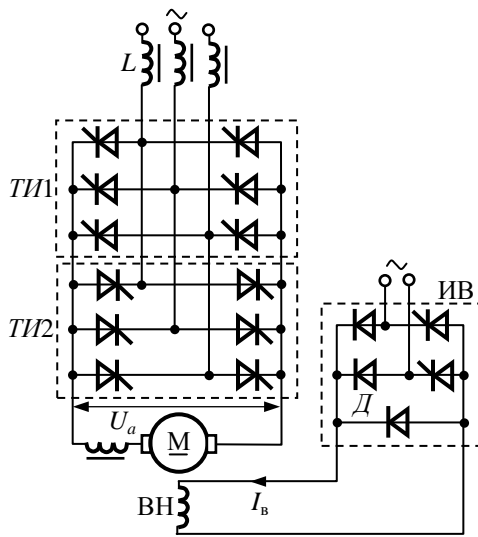
Фиг. 11.23. Закони при регулиране на скоростта на въртене в две зони:
първа зона $M = const$, втора зона $P = const$

Описаните закони за регулиране се реализират от постояннотокови двигатели, които се управляват от различни електронни устройства с полупроводникови прибори. Принципна схема на такова устройство за регулиране на двигател с независимо възбуждане е представена на фиг. 11.24. Котвата е захранена от два трифазни управляеми тиристорни изправителя $ТИ1$ и $ТИ2$, свързани насрещно. Системата за управление не разрешава едновременната работа 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.

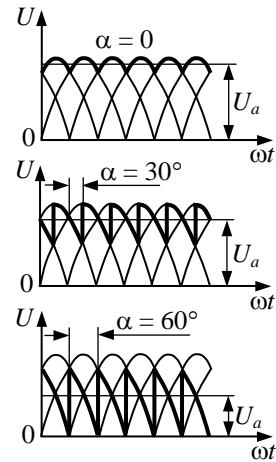
Тиристорните изправители са с естествена комутация и импулсно фазово управление. Напрежението на котвата U_a се регулира чрез изменение на ъгъла на отпушване на тиристорите (фиг. 11.25). Средната стойност на изправеното напрежение е

$$(11.37) \quad U_a = U_m \cos \alpha,$$

където U_m е напрежението при ъгъл на отпушване $\alpha = 0$.



Фиг. 11.24. Реверсивна схема с управляеми тиристорни токоизправители за регулиране на двигател с независимо възбуждане



Фиг. 11.25. Напрежение на котвата при различен ъгъл на отпушване на тиристорите от схемата на фиг. 11.24

Пулсациите на напрежението предизвикват пулсации на тока. За да се намалят пулсациите, последователно на котвата се включва дросел.

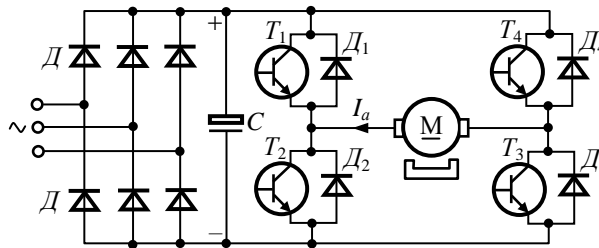
При $\alpha = 90^\circ$ се получава $U_a = 0$, а при $\alpha > 90^\circ$ изправителят работи като инвертор. Тогава двигателят преминава в режим на генераторно спиране и отдава електрическа енергия в мрежата. Следователно машината може да работи в двете посоки на въртене като двигател или генератор. За такова задвижване се казва, че осъществява работа в четири квадранта на характеристиката $n = f(M)$.

Регулирането на скоростта на въртене в първата зона става при $I_b = \text{const}$. Във втората зона е необходимо да се регулира възбудителният ток при постоянна стойност на напрежението U_a . Това става чрез токоизправителя ИВ, който захранва възбудителната намотка на двигателя. Той е еднофазен, полууправляем.

Системите управляем токоизправител – постояннотоков двигател намират значително приложение в регулируемите задвижвания. Те се характеризират с добър к.п.д., отлични динамични свойства и широк обхват на регулиране на скоростта на въртене. Задвижванията с по-високи изисквания се изпълняват с обратни връзки по скорост 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. 11.26 е показана принципната схема на транзисторен преобразувател за регулиране на скоростта на въртене на двигател за постоянен ток с възбуждане от постоянни магнити. Котвената верига е свързана в диагонала на мостова схема, със-

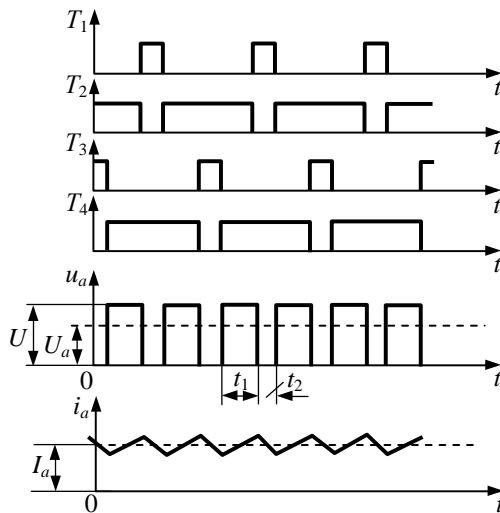
тояща се от четири транзисторни ключа (T_1 до T_4). Транзисторният преобразувател се захранва, от трифазен диоден изправител с филтров кондензатор.



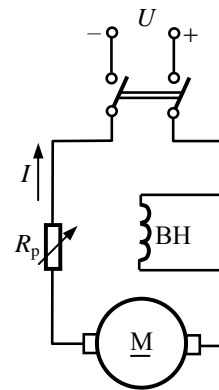
Фиг. 11.26. Реверсивна схема на транзисторен преобразувател за регулиране на двигател с възбуждане от постоянни магнити

На фиг. 11.27 са представени времедиаграмите за управление на транзисторните ключове и функциите на 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

$$(11.38) \quad T = t_1 + t_2.$$



Фиг.11.27. Времедиаграми за управление на транзисторите, напрежение и ток в котвата на двигателя от схемата на фиг. 11.26



Фиг. 11.28. Схема на свързване на двигател с последователно възбуждане

Времената t_1 и t_2 са съответно продължителност на импулса и на паузата. Средната стойност на напрежението се променя чрез изменение на широчината

на импулса t_1 , като се регулира продължителността на отпушване на двойката транзистори. Коефициентът на запълване

$$(11.39) \quad \gamma = \frac{t_1}{T} = \frac{U_a}{U}$$

може да се изменя плавно от 0 до 1 и да се регулира скоростта на въртене.

Системата от фиг. 11.26 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 $n = f(M)$.

Разгледаните две системи се прилагат за главни и подавателни задвижвания на металорежещи машини с цифрово-програмно управление, за задвижване на промишлени работи и манипулатори и за други задвижвания. Управлението е микропроцесорно.

В постояннотоковите двигатели с **последователно** възбуждане токът в котвената и възбудителната намотка е един и същ (фиг. 11.28). Ако се пренебрегне насищането на магнитната верига се получава, че магнитният поток Φ е пропорционален на м.д.н. на възбудителната намотка и следователно на тока в котвата

$$(11.40) \quad \Phi = aI_a.$$

Тогава електромагнитният момент на двигателя е

$$(11.41) \quad M = c_M I_a \Phi = \frac{c_M}{a} \Phi^2,$$

откъдето

$$(11.42) \quad \Phi = b\sqrt{M}.$$

В уравнението на механичната характеристика (11.31) се замества (11.42) и се получава

$$(11.43) \quad n = \frac{U}{c_E b \sqrt{M}} - \frac{r_a}{c_E c_M b^2}$$

или

$$(11.44) \quad n = \frac{k_1}{\sqrt{M}} - k_2.$$

Последното уравнение показва, че *естествената* механична характеристика (за $U = U_n$) на двигателя с последователно възбуждане е хипербола (фиг. 11.29). Намалването на момента M води до значително увеличаване на скоростта на въртене n и обратно. При този тип двигатели не трябва да се допуска работа на празен ход ($M = 0$). От (11.44) следва, че в такъв случай скоростта

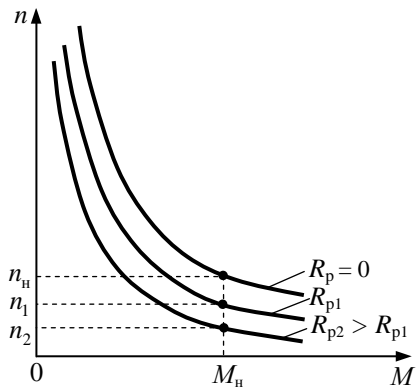
на въртене теоретично се стреми към безкрайност. На практика скоростта на ротора може да се повиши недопустимо и да предизвика повреда на намотката и колектора.

От (11.40) и (11.41) моментът може да се изрази чрез тока

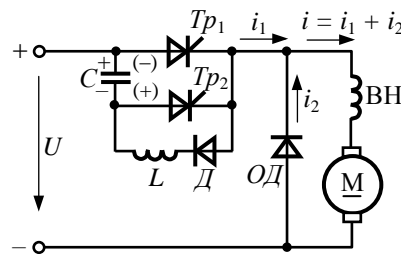
$$(11.45) \quad M = cI_a^2.$$

При пускане на двигателя ($n=0$) се допуска $I_a = (1,5 \div 2)I_n$, откъдето следва, че този двигател има голям пусков момент. Това е важно предимство при задвижването на транспортни средства, където са налице тежки условия на пускане.

Уравнение (11.43) показва, че когато към съпротивлението на котвата се прибави съпротивлението на регулируемия резистор ($r_a + R_p$), получава се серия механични характеристики (фиг. 11.29). По този начин при даден момент може да се регулира скоростта на въртене на двигателя. Това обаче е свързано със загуби на мощност в регулируемия резистор.



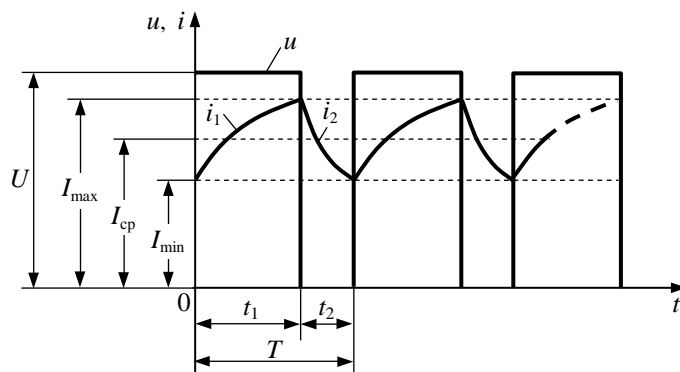
Фиг. 11.29. Механични характеристики на двигател с последователно възбуждане



Фиг. 11.30. Схема на тиристорен импулсен регулатор на двигател с последователно възбуждане

Импулсното регулиране се използва и при двигателите с последователно възбуждане, особено в транспортни средства с акумулатори като автономен източник на електроенергия (електрокари, електромобили). Намаляването на загубите при регулирането позволява да се увеличи пробегът между две зареждания на батерията. Принципната схема на тиристорен импулсен регулатор, която се прилага в посочените случаи, е представена на фиг. 11.30. Схемата за принудителна комутация на главния тиристор Tr_1 се състои от комутационния кондензатор C , спомагателния тиристор Tr_2 , презареждащия диод D и дросела L . Когато Tr_1 е запушен, а Tr_2 провежда, кондензаторът C се зарежда с показания на фи-

гурата поляритет до напрежението на батерията. След като Tr_1 се отпуши, напрежението на кондензатора запущва Tr_2 и кондензаторът се презарежда резонансно през веригата на диода D и дросела L . Напрежението на кондензатора приема противоположен поляритет. Сега след отпушване на Tr_2 напрежението на кондензатора запущва главния тиристор Tr_1 . Следователно, като се подават редуващи се управляващи импулси на работния и спомагателния тиристор, получава се периодично отпушване и запущване на главния тиристор Tr_1 . Така двигателят се включва за време t_1 към напрежението на батерията (фиг. 11.31). През време на импулса токът в двигателя е i_1 . През време 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 .



Фиг. 11.31. Изменение на напрежението и тока на двигател с последователно възбуждане при импулсно регулиране

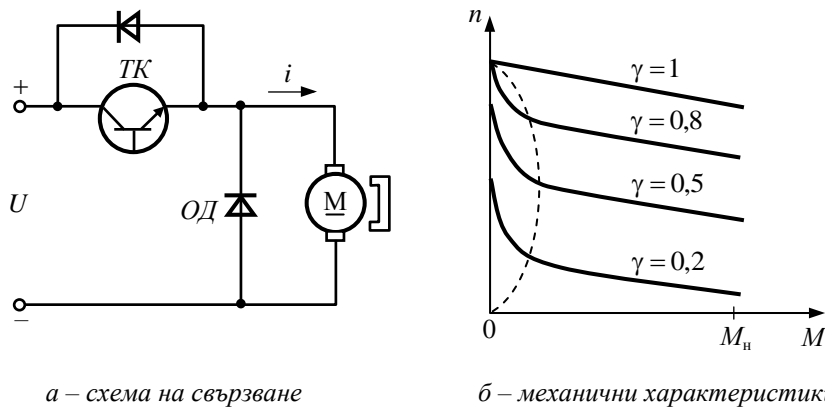
Регулирането на средното напрежение, съответно на средния ток и скоростта на въртене, става чрез изменение на коефициента на запълване

$$\gamma = \frac{t_1}{T}.$$

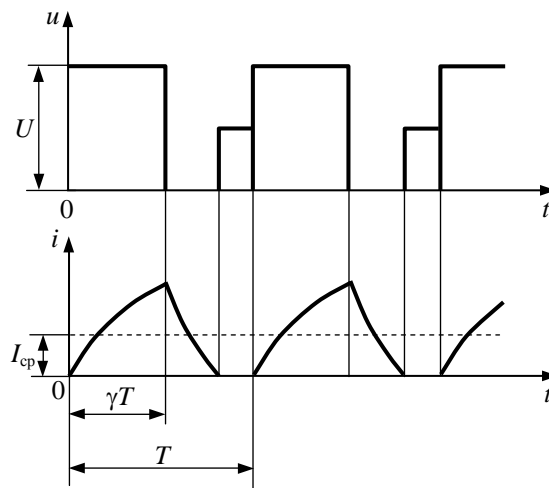
Това се постига или чрез изменение на t_1 при $T = \text{const}$ (ШИМ), или чрез изменение на T при $t_1 = \text{const}$. Използва се и комбинирано управление. Периодът $T = 1/f_m$ се изменя чрез регулиране на модулационната честота обикновено в граници от 10 Hz до (200 ÷ 600) Hz. Механичните характеристики при различни γ имат същия вид като показаните на фиг. 11.29. 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 скоростта на въртене на постояннотокови двигатели с малка мощност и въз-

буждане от постоянни магнити. В този случай във веригата на котвата се свързва транзисторен ключ TK (фиг. 11.32а). При по-големи стойности на натоварването, например за $M > 0,3M_n$, видът на напрежението и тока в котвата е подобен на показания на фиг. 11.31. При по-малко натоварване и ниска модулационна честота (по-голям период T) токът в края на паузата може да се анулира (фиг. 11.33). Получава се режим с прекъсване на тока. Той се характеризира с по-големи пулсации на тока и увеличаване на загубите в двигателя. При тази схема не може да се променя посоката на въртене.



Фиг. 11.32. Двигател с възбуждане от постоянни магнити при импулсно регулиране



Фиг. 11.33. Режим с прекъсване на тока при импулсно регулиране

На фиг. 11.32б 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 увели-

чи модулационната честота. Обаче увеличават се 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 хранване 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 с независимо възбуждане и със само възбуждане. 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 тахогенераторите – информационни микромашини, чието напрежение е пропорционално на скоростта на въртене.

Първичният двигател задвижва генератора с механична мощност P_1 . Тя се преобразува в полезна електрическа мощност на изходите на генератора P_2 . Това преобразуване е съпроводено със загуби на мощност:

$$P_2 = P_1 - \sum p ;$$
$$\sum p = p_v + p_a + p_{\text{ч}} + p_c + p_{\text{мех}} + p_d ,$$

където p_v, p_a са съответно електрическите загуби във възбудителната и котвената верига; $p_{\text{ч}}$ – електрическите загуби в четковия контакт; p_c – загубите в стоманата на котвата; $p_{\text{мех}}$ – механичните загуби; p_d – допълнителните загуби.

В генератора съществуват същите видове загуби както в двигателя, както личи от сравнението с (11.28).

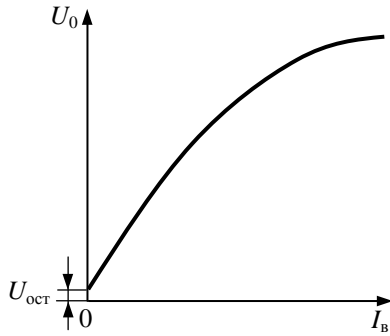
Свойствата на генератора се определят от начина на възбуждането му. Тези свойства се анализират с помощта на характеристиките на генератора. Основните характеристики на генераторите за постоянен ток са същите както съответните характеристики на синхронните генератори. Тук ще разгледаме само някои от тях за генератор с независимо възбуждане.

Характеристиката на празен ход (х.п.х.) е зависимостта $U_0 = f(I_b)$ при отворена верига на котвата ($I_a = 0$) и постоянна скорост на въртене $n = \text{const}$ (фиг. 11.34). От (11.5) и (11.15) се намира

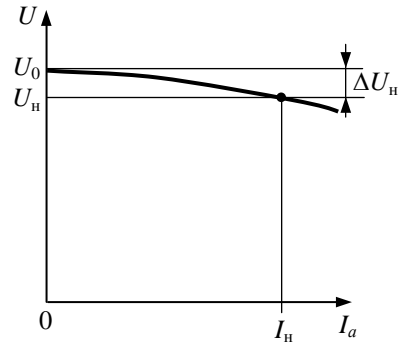
$$U_0 = E_a = k\Phi .$$

Следователно х.п.х. в друг мащаб представлява зависимостта $\Phi = f(I_b)$. 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 про-

тивен случай точките не са на един и същи хистерезисен цикъл и затова се разсейват. Напрежението $U_{ост}$, което се получава при $I_B = 0$, се дължи на остатъчния магнетизъм на главните полюси. То е $(2 \div 3) \%$ от номиналното напрежение.



Фиг. 11.34. Характеристика на празен ход



Фиг. 11.35. Външна характеристика на генератор с независимо възбуждане

Външната характеристика (фиг. 11.35) е зависимостта на напрежението на изводите на генератора от тока в котвата при постоянни стойности на скоростта на въртене и възбудителния ток

$$U = f(I_a) \text{ при } n = \text{const и } I_B = \text{const.}$$

От тази характеристика се определя намаляването на напрежението при увеличаване на товарването на генератора. То се дължи на пада на напрежение в котвената верига $r_a I_a$ и на намаляване на E_a поради размагнитващото действие на реакцията на котвата. Изменението на напрежението между празен ход ($I_a = 0$) и номинално натоварване ($I_a = I_H$), изразено в %, е

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} 100\%.$$

За генераторите с независимо възбуждане ΔU_H е в граници $(5 \div 10)\%$.

Възбудителната намотка на генераторите с **паралелно** възбуждане е свързана паралелно на котвената намотка. Самовъзбуждането 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 с уравнението

$$(11.46) \quad U_B = R_B i_B + \frac{d(L_B i_B)}{dt}.$$

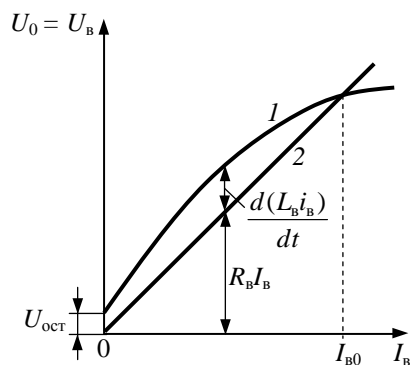
Това уравнение е записано за контура на възбудителната намотка, който има съпротивление R_B и индуктивност L_B . Тъй като при празен ход $U_0 = U_B$ зависимостта $U_B = f(i_B)$ представлява характеристиката на празен ход, показана

на фиг. 11.36 (крива 1). На същата фигура е построена и правата 2. Тя представлява характеристиката $R_B i_B = f(i_B)$. Разликата между ординатите на кривата 1 и правата 2 е $\frac{d(L_B i_B)}{dt}$, както следва от (11.46). Когато тази разлика е положителна ($\frac{di_B}{dt} > 0$), токът във възбудителната намотка се увеличава, докато достигне стойност I_{B0} – пресечната точка на х.п.х. и правата 2. В тази точка производната $\frac{di_B}{dt} = 0$ и се установява възбудителен ток $I_{B0} = \text{const}$. Процесът на самовъзбуждане е завършен.

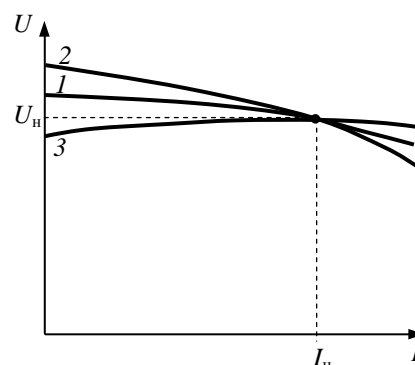
От направения анализ следва, че за да може да се самовъзбуди един генератор с паралелно възбуждане, необходимо е да бъдат изпълнени следните условия:

1. Процесът на самовъзбуждане може да започне само ако съществува остатъчен магнетизъм. В случай че $U_{\text{ост}} = 0$, 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 $U_{\text{ост}}$. Ако при зададена посока на въртене трябва да се промени полярността на изводите на генератора, трябва да се смени и полярността на $U_{\text{ост}}$ чрез пренамагнитване. За да нараства възбудителният ток, краищата на възбудителната намотка трябва да са свързани правилно.



Фиг. 11.36. Самовъзбуждане на генератор с паралелно възбуждане



Фиг. 11.37. Сравнение на външните характеристики на генератори с независимо (1), паралелно (2) и смесено съпосочно (3) възбуждане

3. Положителна разлика между х.п.х. (крива 1) и правата $R_B i_B$ (права 2) се получава само ако тези линии се пресичат. Следователно съпротивлението на

възбудителната верига R_v трябва да бъде минимално, равно само на съпротивлението на възбудителната намотка.

Външната характеристика на генераторите с паралелно възбуждане се снима при неизменно съпротивление на възбудителната верига $R_v = \text{const}$. Тя се характеризира с по-голямо изменение на напрежението ΔU отколкото 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 става 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 потока и на индуктираното е.д.н. в котвата E_a да съответства на стойността на пада ΔU .

Качественият анализ на свойствата на генераторите с различни възбудителни системи е илюстриран на фиг. 11.37. Сравнени са 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.