

Николай Вълов

**УПРАВЛЕНИЕ НА
ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ СИСТЕМИ**

ИЗДАТЕЛСТВО “БРЯГ”

2017

УДК: 62-83(075.8)
621.313-5(075.8)

Вълов, Н., Управление на електромеханични системи,
Издателство "БРЯГ", Русе, 2017.

Настоящият учебник е преработено, обновено и допълнено издание на записките по курса лекции четени, в съответствие с учебния план, пред студенти специалност „Компютърно управление и автоматизация“ (КУА) на Русенски университет „Ангел Кънчев“ по дисциплината “Управление на електромеханични системи“.

Част от съдържанието е предназначено за студенти от специалност „Земеделска техника и технологии“ (ЗТТ), изучаващи дисциплината “Задвижване в земеделската техника”.

Учебникът може да се използва и от студенти специалности „Електроенергетика и електрообзавеждане“ (ЕЕО), „Електроинженерство“ (ЕИ), „Механотехника и мехатроника“ (ММ), „Индустриално инженерство“ (ИИ) или от специалисти, работещи в областта на електrozадвижванията.

© Николай Петков Вълов, автор

Емил Константинов Кузманов., рецензент

© Издателство "БРЯГ"

ISBN 978-619-90584-1-1



ISBN 978-619-90584-1-1

Глава 1

МЕХАНИКА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО

1.1. Определяне на понятието „Електроздвижване“

За процесите на материалното производство се използват различни по вид и предназначение производствени механизми.

Производствен механизъм - работна машина, е тази машина, която изпълнява производствена/ транспортна операция или участва в определен технологичен процес. За задвижването ѝ се използва двигател, апаратура за неговото управление и предавка от двигателя към работната машина. Тези три елемента се обединяват под общото понятие *задвижване*.

Електродвигателят, поради високият си коефициент на полезно действие, простата си конструкция и лесното си управление, е основния вид двигател, използван в задвижването на работната машина, като е изместил останалите видове двигатели. Следователно, електроздвижването е комплексно устройство, състоящо се от електродвигател, апаратура за неговото управление и предавка от електродвигателя към работната машина.

В много случаи, двигателят не се захранва от мрежата, а посредством специални преобразувателни устройства. Те също се включват в понятието електроздвижване, т.к. са предназначени за управление на електродвигателя.

При електроздвижването се осъществява преобразуване на електрическа в механична енергия и се осигурява електрическо/ електронно управление.

Възможни са три основни вида електроздвижване: *групово, единично и многодвигателно*.

Групово електроздвижване е това електроздвижване, при което един електродвигател, чрез трансмисионни предавки, задвижва няколко производствени механизма. Поради техническото му несъвършенство, този вид електроздвижване днес не се използва.

Единично електроздвижване е това, при което всеки производствен механизъм се задвижва от отделен двигател. В много случаи електроздвижването и производственият механизъм са обединени конструктивно в едно цяло. Този вид задвижване дава възможност за независимо управление и регулиране на скоростта на всяка машина, опростена предавка, подобрени условия и безопасност при работа и др..

Многодвигателното електроздвижване е това, при което за задвижване на един производствен механизъм се използват няколко електродвигателя. Всеки от тях привежда в движение различен работен орган от механизма. Многодвигателното електроздвижване осигурява максимална производителност на труда и възможност за пълна автоматизация на производството. Електродвигателите в него често се сливат с работните органи на механизма и са неразделна част от него. Електроздвижването и задвижваният от него производствен механизъм, образуват сложно устройство, което обобщено се нарича *електромеханична система*.

1.2. Основни уравнения на движението при електроздвижването

Електромеханичната система може да работи или с постоянна, или с променяща се скорост. Режимът на работа в първият случай, се нарича установлен, а във втория - преходен. Изменението на скоростта, по време на работа на механизма, може да бъде предизвикано от промяна на натоварването, колебание на напрежението или други причини.

Всяко изменение в установения режим на електромеханичната система е съпроводено с промяна и на кинетичната енергия, запасена в работния механизъм и в движещите се части на електроздвижването. В резултат на това се изменят скоростта, момента и мощността на двигателя.

Основното уравнение за въртеливо движение се използва за анализ и изследване поведението на електроздвижването в периоди на промяна на скоростта.

От теоретичната механика е известно, че при въртеливо движение на всяка материална система, двигателният момент - M извършва работа, необходима за преодоляване на статичния съпротивителен момент M_c и за изменението на кинетичната енергия на въртящите се части. В установлен режим, работата, която се извършва при завъртане на ъгъл $d\alpha$ (rad) е:

$$dA = M d\alpha, \quad J (\text{W.s}, (\text{N.m}))$$

Ако работата на момента M се означи с A , а работата на момента M_c - с A_c , то за интервала от време dt се получава:

$$dA = dA_c + d\left(J \frac{\omega^2}{2}\right), \quad 1.1$$

където J е инерционният момент.

Диференцирайки (1.1) по време, се получава:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA_c}{dt} + \frac{d\left(J \frac{\omega^2}{2}\right)}{dt}, \quad 1.2$$

т.к. произведението на мощността по времето представлява работата, изразът (1.2), добива вида:

$$P - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{dt}, \quad 1.3$$

където $P = dA/dt$ и $P_c = dA_c/dt$

Инерционният момент J е променлив само за сравнително малък брой движещи се механизми. По-често той е функция на ъгъла на завъртането α на работния орган и определянето на dJ/dt е трудно. В този случай изразът (1.3), може да се преобразува, чрез умножение и деление на последният член с $d\alpha$:

$$P - P_c = J\omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt}, \quad 1.4$$

Разделяйки двете части на (1.4) с ъгловата скорост ω и отчитайки, че $\omega = d\alpha/dt$, се получава:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}, \quad 1.5$$

където $M = P/\omega$ и $M_c = P_c/\omega$

Изразът (1.5) представлява уравнение на движението на електроздвижването в най-общ вид.

Когато инерционният момент е $J = const$ (за повечето механизми), уравнението на движението добива вида:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad 1.6$$

където M е въртящият момент на двигателя на електроздвижването, N.m;

M_c – статичен съпротивителен момент, N.m;

J – инерционен момент на въртящите се части ($J = m \cdot r^2$), kg.m²;

$Jd\omega/dt$ – динамичен момент, N.m.

Дясната част на изразите (1.5) и (1.6) има дименсия на момент и се нарича динамичен момент, т.е.

$$M - M_c = M_{дин}, \quad 1.7$$

В уравнението (1.5) динамичният момент се състои от две части. Първата е резултат от промяната на скоростта. Втората - следствие от изменението на инерционния момент.

Когато $J = const$, динамичният момент се определя само от изменението на скоростта. Той се проявява в преходните режими тогава, когато се изменя скоростта на електrozадвижването. При ускоряване се противопоставя на движението, а при спиране поддържа движението (задължително условие е системата да е статически устойчива). Знакът и големината на динамичният момент се определят от алгебричната разлика между двигателния и съпротивителния моменти. По този начин от знака на $M_{дин}$, са възможни следните режими на работа на електrozадвижването.

- при $M_{дин} > 0$ двигателният момент е положителен, по-голям от съпротивителния ($M > M_c$), $d\omega/dt > 0$ и движението е ускорително;
- при $M < M_c$ динамичният момент $M_{дин} < 0$, $d\omega/dt < 0$ и следователно движението е закъснително;
- при $M = M_c$, динамичният момент е нула, $d\omega/dt = 0$ - следователно задвижването работи в установен режим, т.е. $\omega = const$.

При използване уравнението на движение е необходимо да се определят знаците на моментите M и M_c спрямо посоката на въртене на двигателя. В тази връзка се разглеждат и величините: ъгъл на завъртане, скорост и ускорение. Една от възможните посоки на двигателя се приема за положителна, а другата за отрицателна. Прието е за положителна да се приема движението по часовниковата стрелка (на дясно). При положителната посока, скоростта на двигателя е съпосочна с въртящия момент M , и режимът на работа се приема за двигателен. В обратния случай, при несъвпадение на посоките на скоростта и въртящия момент, режимът на работа е спирачен.

Съпротивителният момент M_c е положителен, когато действа обратно на положителната скорост на въртене. Най-често действието му е противоположно на движението, но има определени условия, при които може да действа и по посоката на движение.

В съответствие с това, статичните съпротивителни моменти биват *реактивни и активни* (потенциални).

Реактивните съпротивителни моменти винаги са противопоставят на посоката на движението. Такива са: моментите от опън, натиск, срязване и усукване на нееластични тела; моментите на триене и др..

Активните съпротивителни моменти не сменят посоката си при изменение на посоката на движение. Те се проявяват, както като съпротивителни, така и като движещи моменти. Активните моменти са резултат от силите на усукване, опън или натиск на еластични тела; от силата на теглото и др.. Например:

моментът създаван от товара при подемните механизми. При посока на издигане той се противопоставя на движението, а при спускане го подпомага и се проявява като движещ.

1.3. Привеждане на статичните и инерционните моменти към вала на двигателеля

При прости движещи се системи, в които има само един вал, въртящ се с определена скорост, съставянето и решаването на уравнението на движението е много лесно. В голям брой задвижвания, двигателят се съединява с работният орган на производствения механизъм чрез междинна предавка. Наличието ѝ усложнява кинематичната верига, когато определени нейни елементи имат скорост, различна от скоростта на въртене на електродвигателя. Уравнението на движението се отнася за система, в която скоростта е еднаква за всички елементи. За да се реши системата при кинематична верига, включваща звена въртящи се с различни скорости, е необходимо да се запишат уравнения на движението за всяко отделно звено на механизма и след това да се решат съвместно получените уравнения.

За да се опрости решаването на задачата за реална движеща се система, която включва двигател, работен механизъм и предавка, е необходимо да се замени с еквивалентна приведена система. В приведената система всички елементи се движат със скоростта на двигателеля. За запазване на кинетичните и динамичните свойства на действителната система, трябва да се преизчислят двигателния, съпротивителния и инерционния момент, получени в приведената система. При превеждането на съпротивителния момент M_{cm} на механизма, към вала на двигателеля, се приема условието за равенство на мощностите на вала на двигателя и производствения механизъм,

$$M_c \omega = \frac{M_{cm} \omega_m}{\eta_{pr}}$$

където M_c е приведен към вала на двигателя съпротивителен момент;

η_{pr} – к.п.д. на предавката.

От горното уравнение се определя приведеният съпротивителен момент.

$$M_c = \frac{M_{cm}}{\eta_{pr}} \frac{\omega_m}{\omega} = \frac{M_{cm}}{\eta_{pr} i} \quad 1.8$$

където $i = \omega / \omega_m$ е приведеното отношение на двигателя към механизма.

При наличие на няколко предавки между двигателеля и механизма с преводни отношения i_1, i_2, \dots, i_n и съответните к.п.д. $\eta_{pr1}, \eta_{pr2}, \dots, \eta_{prN}$ приведеният към вала на двигателя съпротивителен момент ще бъде:

$$M_c = M_{cm} \frac{1}{\eta_{pr1} \cdot \eta_{pr2} \dots \eta_{prN}} \times \frac{1}{i_1 \cdot i_2 \dots i_n} \quad 1.9$$

Привеждането на инерционни моменти от един вал към друг се получава от условието за равенство между запаса на кинетичната енергия в реалната и приведената система:

$$J_{pr} \frac{\omega^2}{2} = J_m \frac{\omega_m^2}{2} \quad 1.10$$

където J_m е инерционен момент на механизма, когато се върти със скорост ω_m .

От уравнение (1.10), за приведения инерционен момент, се получава:

$$J_{pr} = J_m \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2 = \frac{J_m}{i^2} \quad 1.11$$

При наличие на няколко междинни предавателни звена, които се въртят със скорости $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ и имат съответно инерционни моменти J_1, J_2, \dots, J_n , приведеният инерционен момент на тези звена към вала на двигателя се представя с уравнението:

$$J_{pr} = J_1 \left(\frac{\omega_1}{\omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\omega_2}{\omega} \right)^2 + \dots + J_n \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2$$

или

$$J_{pr} = \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_2^2} + \dots + \frac{J_n}{i_n^2} \quad 1.12$$

където i_1, i_2, \dots, i_n са приведените отношения от вала на двигателя към валовете на отделните звена.

Приведеният инерционен момент на цялата електромеханична система J е:

$$J = J_d + J_{pr} \quad 1.13$$

където J_d е инерционният момент на двигателя.

Ако се умножат левите и десните части на уравненията (1.12) и (1.13) с 4g, ще се получат уравнения за приведения към вала на двигателя мащов момент:

$$GD_{pr}^2 = \frac{GD_1^2}{i_1^2} + \frac{GD_2^2}{i_2^2} + \dots + \frac{GD_n^2}{i_n^2} \quad 1.14$$

Уравнението (1.14) отчита връзката между инерционната и мащовата представка с равенството:

$$J = \frac{G D^2}{g 4} = \frac{GD^2}{4g} \quad 1.15$$

където G е теглото, N;

D - инерционен диаметър, m;

g - земното ускорение, m/s^2 .

Общийт приведен мащов момент на електромеханичната система е:

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_{pr}^2, N \cdot m^2 \quad 1.16$$

При много производствени механизми част от елементите извършват въртеливо движение, а друга – постъпателно. Това налага привеждане на постъпателното движение към въртеливо. За силата на статичното съпротивление F_m , N се намира съответстващ съпротивителен момент M_c , така че да е изпълнено равенството на мощностите на вала на двигателя и на производствения механизъм:

$$F_m v_m = M_c \omega \eta_{\text{пр}} \quad 1.17$$

където v_m е скорост на постъпателното движение, m/s;

ω - ъгловата скорост на вала на двигателя, rad/s.

Полученият приведен съпротивителен момент от горното уравнение е:

$$M_c = F_m \frac{v_m}{\omega} \frac{1}{\eta_{\text{пр}}} \quad 1.18$$

При необходимост от обратно привеждане – въртеливото движение към постъпателно, големината на приведената сила е:

$$F_c = M_m \frac{\omega_m}{v} \eta_{\text{пр}} \quad 1.19$$

За привеждането на масите, които се движат постъпателно, към приведен инерционен момент при въртеливо движение, се използва условието за равенство на запасената кинетична енергия в реалната и приведената система:

$$m_m \frac{v_m^2}{2} = J_{\text{пр}} \frac{\omega^2}{2} \quad 1.20$$

или

$$J_{\text{пр}} = m_m \left(\frac{v_m}{\omega} \right)^2 \quad 1.21$$

където $m_m = G/g$ е масата на постъпателно движещите се части.

Аналогично за приведения махов момент GD^2 , съгласно уравнение (1.16) се получава:

$$GD^2 = 4G_m \left(\frac{v_m}{\omega} \right)^2 \quad 1.22$$

където G_m е теглото на постъпателно движещите се части.

При обратно преобразуване на въртеливото движение към постъпателно със скорост v е необходимо инерционният момент J да се приведе към еквивалентна движеща се маса m_c и съпротивителна сила на теглото F_c съгласно уравнението:

$$m_c = J \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 \quad \text{и} \quad G_c = \left(\frac{GD^2}{4} \right) \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 \quad 1.23$$

При производствени механизми, с въртящи се и постъпателно движещи се елементи, общият приведен инерционен момент към вала на двигателя в механичната система в съответствие с уравнения (1.12) и (1.21) се получава:

$$J = J_{\Delta} + \sum_{x=1}^k J_x \left(\frac{\omega_x}{\omega} \right)^2 + \sum_{y=1}^n m_y \left(\frac{v_y}{\omega} \right)^2 \quad 1.24$$

Приведеният махов момент на механичната система съгласно уравнение (1.15) е:

$$GD^2 = GD_{\Delta}^2 + \sum_{x=1}^k GD_x^2 \left(\frac{\omega_x}{\omega} \right)^2 + \sum_{y=1}^n 4G_y \left(\frac{v_y}{\omega} \right)^2 \quad 1.25$$

За решаване на уравнението на движението е необходимо да се знае сумарният приведен инерционен момент на механичната система. Стойностите на инерционният момент на двигателните и производствените механизми, както и техните махови моменти, могат да бъдат откриети в съответните каталоги. При липса на каталожни данни, инерционният момент се определя по опитен път чрез различни методи, описани в литературата.

Разглежданите въпроси от механиката на движението са от изключителна важност при проектирането, изпълнението и експлоатацията на електромеханичните системи.

Глава 2

МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО

2.1. Механични характеристики на електродвигателите

Правилният избор на двигател е важно условие за постигане на висока производителност и икономична работа на производствените механизми. Двигателят трябва да осигурява най-ефективното протичане на установените и преходните процеси на механизма. Това се определя основно от *механичните му характеристики*, които са връзката между скоростта на двигателя и развииваният от него въртящ момент т.е. $\omega = f(M)$.

За оценка на *електромеханичните* свойства (в отделни случаи) на електродвигателите се използва зависимостта $\omega = f(I)$, наречена *електромеханична характеристика*.

В зависимост от вида на схемата, по която електродвигателят е включен към енергийния източник, се променя и неговата механична характеристика. *Естествената механична характеристика* $\omega = f(M)$ се получава при нормална схема на включване и номинални параметри на захранващата мрежа, отговарящи на каталожните данни на двигателя. Тези условия се наричат *номинален режим на работа*, включително M_n , I_n и ω_n . Всички характеристики, които се получават при условия различни от горепосочените се наричат *изкуствени (реостатни)*. Почти при всички електродвигатели, механичната характеристика е падаща, т.е. при увеличаване на момента M , скоростта ω на двигателя се намалява. Промяната на скоростта при изменението на въртящия момент е различно за всеки двигател и това

характеризира *твърдостта* на механичната му характеристика. Тя се оценява с коефициента на твърдост:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega} \times 100 \approx \frac{\Delta M}{\Delta \omega} \times 100, \% \quad 2.1$$

В зависимост от коефициента на твърдост, механичните характеристики се разделят на три основни групи:

- а) *абсолютно твърди* ($\beta = \infty$) - скоростта на двигателеля остава постоянна при изменение на момента. Такава механична характеристика имат синхронните двигатели.
- б) *твърди*, с коефициент на твърдост $\beta > 10\%$. Характерни са за двигателите за постоянен ток с независимо възбудждане, асинхронните двигатели в работната част от характеристиката си и др..
- в) *меки* са механичните характеристики със значително изменение на скоростта при изменение на момента, за които коефициента на твърдост е $\beta < 10\%$. Такава характеристика имат постояннотоковите двигатели с последователно възбудждане.

2.2. Механични характеристики на производствени механизми

Механичната характеристика на производствения механизъм се представя от зависимостта между скоростта на въртене и статичният съпротивителен момент на механизма, т.е. $\omega = f(M_c)$. Тази характеристика е основен критерий, както за избора на мощността на двигателеля за механизма, така и за правилното проектиране на всички елементи на електrozадвижванията.

Според вида на механичната характеристика производствените механизми са:

- а) с независима от скоростта механична характеристика;
- б) със зависим от скоростта съпротивителен момент.

Първата група обхваща механизмите, при които съпротивителният момент е постоянен по големина и не зависи от скоростта:

$$M_c = const \quad 2.2$$

Такава механична характеристика имат подемните механизми, асансьори, транспортните ленти, някои металорежещи машини и други механизми, при които съпротивителният момент се определя основно от силите на триене.

При втората група механизми зависимостта на статичния съпротивителен момент от скоростта е различна за различните производствени механизми. При тях големината на съпротивителният момент на механизма може да се определи с уравнението на Бланк:

$$M_c = M_o + (M_{ch} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_h} \right)^x \quad 2.3$$

където M_c е статичният съпротивителен момент на механизма при скорост ω ;
 M_o - момент на триене при работа на празен ход (без натоварване);
 M_{ch} - момент на производствения механизъм при номинална скорост;
 x - степенен показател, характеризиращ изменението на съпротивителния момент при изменение на скоростта.

За различни стойности на степенния показател x от уравнение (2.3), се получават следните основни видове механични работни характеристики на механизма:

а) $x = 0$ и $M_c = M_{ch} = const$

т.е. статичният момент не зависи от скоростта - характеристика 1 от фиг.2.1.

б) $x = 1$ и $M_c = M_o + (M_{ch} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_h} \right)$

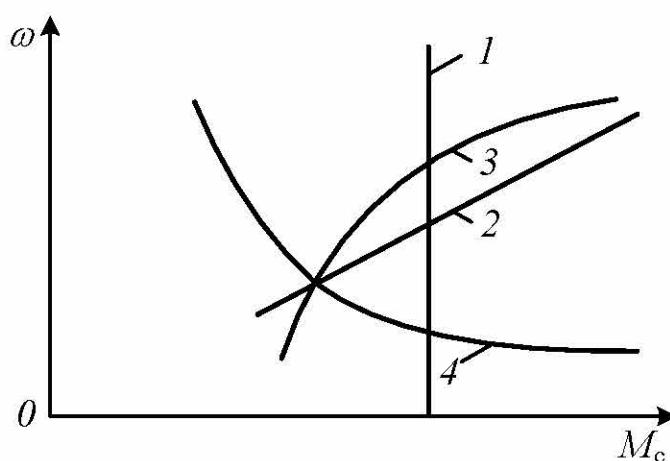
т.е. линейно нарастваща характеристика 2 от фиг.2.1. В този случай моментът зависи линейно от скоростта. Такава характеристика притежава генераторът за постоянен ток с независимо възбудждане, работещ на постоянно външно съпротивление.

в) $x = 2$ и $M_c = M_o + (M_{ch} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_h} \right)^2$

т.е. статичният съпротивителен момент е пропорционален на квадрата на скоростта - характеристика 3 от фиг.2.1. Характерна за вентилаторите, центробежните помпи, компресорите, центрофугите и др..

г) $x = -1$ и $M_c = M_o + (M_{ch} - M_o) \left(\frac{\omega_h}{\omega} \right)$

т.е. M_c и ω са в хиперболична зависимост - характеристика 4 от фиг.2.1. Такава механична характеристика притежават механизмите на главното движение при повечето металорежещи машини. По-рядко обаче се срещат и механизми, при които съпротивителен момент е функция на други величини - изминат ъглов път α или време t .



Фиг.2.1 Видове механични характеристики на работните машини

2.3. Устойчива работа на електромеханична система

Механичните характеристики на двигателите и производствените механизми са твърде различни по вид. Съгласно основното уравнение на движението, електrozадвижването работи в установен режим, когато двигателният момент M и съпротивителният момент M_c са равни по между си, т.е. $M = M_c$. Ако механичните характеристики на двигателя и на производствения механизъм са известни, може да се определи скоростта, при която настъпва установен режим на работа. Скоростта се определя от пресечната точка на двете механични характеристики, т.к. е изпълнено условието $M = M_c$. Това условие обаче не е достатъчно. Електромеханичната система може да се използва само при *устойчива работа*. Под понятието *устойчива работа* се разбира, възможността на електромеханичната система да има способност да се връща в устойчиво равновесие, дори ако под действие на смущение е била изведена от това състояние. Смущаващите въздействия могат да са измененията в натоварването, захранващото напрежение, честотата на мрежата и др..

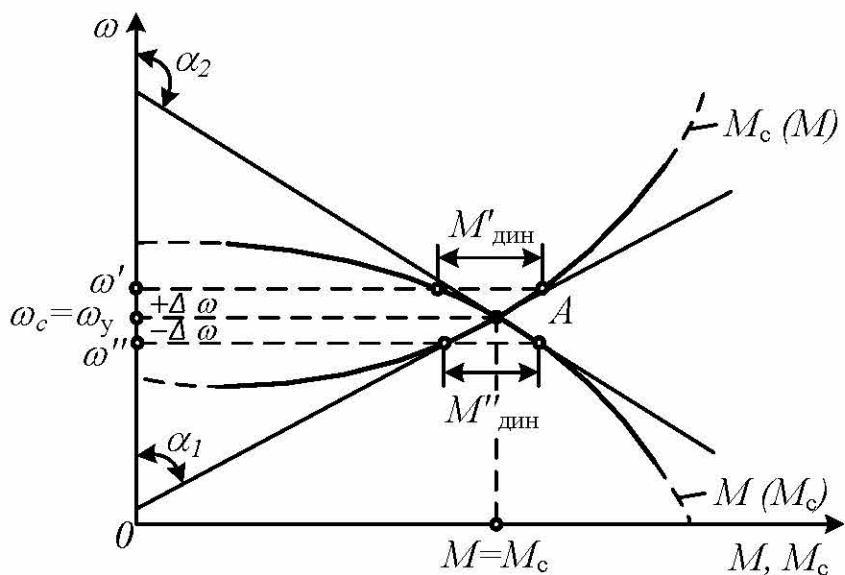
За да работи електромеханичната система устойчиво, трябва при проектирането на електrozадвижването да е известна механичната характеристика на механизма. За осигуряване на необходимите условия за съвместна работа се избира механичната характеристика на двигателя със съответната форма. При постъпване на смущаващо въздействие протича сравнително бавен преходен процес и можем да пренебрегнем електромагнитната инерция във веригите на двигателя. В този случай се разглежда само т. нар. *статична устойчивост*. Понятието е равносилно на понятието *саморегулиране*.

Статичната устойчивост се анализира на база механичните характеристики на двигателя и на производствения механизъм (фиг.2.2). При пресичане на механичните характеристики на двигателя и работния механизъм в т.А се получава устойчив режим на работа, защото $M = M_c$ и $(d\omega/dt) = 0$.

При нарушаване на установеното състояние, под действието на външна причина, моментите и ъгловата скорост ще се изменят с ΔM , ΔM_c , $\Delta \omega$. Поведението на електrozадвижването в този случай ще се определя от основното уравнение на движението.

$$M - M_c = J \frac{\omega}{dt} ; \quad M - M_c = M_{дин}$$

Това означава, че знакът на динамичния момент трябва да се противопоставя на знака на изменението на скоростта.



Фиг. 2.2. Статична устойчивост на електромеханичната система

На фиг. 2.2 се вижда, че при увеличаване на скоростта от ω_y на ω' , със стойност $+\Delta\omega$, динамичният момент $M'_\text{дин}$ намалява, т.к. стойността на M_c е поголяма от M и $M'_\text{дин} = M - M_c < 0$. Този отрицателен динамичен момент ще обуслови намаляване на скоростта от ω' до ω_y и съответно преодоляване на смущението. Аналогично, при намаляване на скоростта от ω_y на ω'' с $-\Delta\omega$, динамичният момент $M''_\text{дин} > 0$, ще върне скоростта от ω'' отново до ω_y . Тази система е статически устойчива и е показана чрез криви с означения M и M_c на фигурата.

Противоположно е поведението на системата, ако механичните характеристики са разположени обратно – (M) , (M_c) . При увеличаване на скоростта ще възникне динамичен момент с положителен знак, което ще увеличи още повече ω . Това от своя страна, ще доведе до увеличаване стойността на $M'_\text{дин}$ и т.н. Скоростта ω ще нараства теоретично до безкрайност (разрушаване на системата). При намаляване на ω процесите ще се развият в посока до пълното спиране на системата ($\omega=0$). Тази система е статически неустойчива.

Критерий за определяне на статистическата устойчивост може да бъде и условието:

$$\operatorname{tg}\alpha_2 < \operatorname{tg}\alpha_1 \quad 2.5$$

т.е. тангенсът на ъгъла на допирателната към механичната характеристика на двигател в равновесната точка, т. A , и координатната ос на скоростта – $\operatorname{tg}\alpha_2$, да бъде по-малък от тангенса на ъгъла на допирателната в кривата на статичният момент – $\operatorname{tg}\alpha_1$, т.е.

Това твърдение може да бъде анализирано с помощта на основното уравнение на движението, отнесено към крайни нараствания на ω и M и критерия на Хурвиц за устойчиво движение на системата.

2.4. Режими на работа на електродвигателя в електромеханична система

Механичните характеристики се представят в правоъгълна координатна система с оси ω и M . Положението на точките, получени от координатите на ω и M в тези квадранти, определят режима на работа на двигателя. При приета положителна посока на движение за всяка точка от I-ви и III-ти квадрант на координатната система (с изключение на осите, където знаците на скоростта и момента са еднакви), съответстват на работата извършена от електрическия двигател $M_\omega > 0$, т.е. двигателят преобразува електрическата енергия в механична. За точките в квадранти II-ри и IV-ти, където знаците на скоростта и момента са различни, се потребява механична енергия от двигателя $M_\omega < 0$. В този случай двигателят преобразува механичната енергия в електрическа. Това означава, че работата в спирачен режим може да се използва за генериране на енергия.

В двигателният режим електрическата машина развива двигателен момент, а в генераторният - спирачен момент. Това определя електродвигателите, като обратими машини, които при определени условия могат да работят, като генератори.

Спирачните режими на електродвигателите се класифицират по следният начин:

- *генераторно (рекуперативно) спиране* - при това спиране електрическата енергия се отдава в захранващата мрежа;
- *спиране с противовключване* - енергията се изразходва под формата на топлина, както механичната енергия от вала, така и електрическата енергия от мрежата;
- *динамично спиране* - при този спирачен режим се изразходва само преобразуваната електроенергия, т.к. двигателят е изключен от захранващата мрежата и работи като генератор, който отдава енергията си на включен към него допълнителен товар, най-често резистор.

2.5. Основни показатели за регулиране на скоростта на електrozадвижванията

Под понятието *регулиране на скоростта на електrozадвижването* се разбира принудително изменение на скоростта на двигателя, съгласно изискванията на работния механизъм, независимо от големината и характера на натоварването. За регулиране на скоростта на електrozадвижването,

управляващото въздействие се подава автоматично от специални устройства или от оператор.

Съществуват различни начини за регулиране скоростта на електрическите двигатели в механичните системи. Това се осъществява посредством получаване на изкуствени (регулировъчни) характеристики, което позволява да се опости чувствително конструкцията на производствената машината и да се повиши производителността ѝ.

За оценка качествата на различните начини за регулиране на скоростта на електроздвижванията служат следните основни показатели:

1. *Диапазон на регулиране на скоростта*, D - се нарича отношението на максималната скорост ω_{max} към минималната скорост ω_{min} , което може да се получи при зададен съпротивителен момент, най-често равен на номиналния.

Диапазонът на регулиране се представя с коефициента:

$$D = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} \quad 2.6$$

и се изразява най-често, като отношение на две числа (3:1, 5:1, 30:1 и т.н.). Той е различен за различните начини за регулиране на скоростта.

2. *Плавното регулиране на скоростта* се определя от коефициента на плавност K , който се представя с отношението на две съседни скорости ω_i и ω_{i-1} при преминаване от една регулировъчна характеристика i към най-близката ѝ съседна, т.е.:

$$K_{пл} = \frac{\omega_i}{\omega_{i-1}} \quad 2.7$$

3. *Икономичността на регулирането*, η - характеризира загубите на енергия в регулировъчните устройства и се представя с коефициента на полезно действие на системата за регулиране:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad 2.8$$

където P_2 е полезната мощност на вала на двигателя;

ΔP – загубите на мощност, възникнали при регулиране на скоростта.

Различните начини за регулиране на скоростта се различават по икономичност.

4. *Посоката на регулиране на скоростта* – показва дали изкуствените характеристики са разположени под или над естествената механична характеристика.

5. *Стабилността на работа* при зададена скорост, се определя от големината на изменението на скоростта при определено отклонение на съпротивителния момент. Малкото отклонение на скоростта определя по-голяма стабилност на работа на двигателя. Тя от своя страна зависи от

твърдостта на механичната характеристика, по която работи двигателя. Твърдата механична характеристика определя стабилната работа на двигателя. При меката - измененията на скоростта, обусловено от колебанията в натоварването, могат да станат недопустимо големи и това ограничава диапазона на регулиране.

6. *Допустимото натоварване* зависи от начините за регулиране на скоростта. При всеки производствен механизъм има различно по характер натоварване на двигателя при регулиране на скоростта. При някои механизми регулирането на скоростта се осъществява при постоянен момент на вала (например подемни механизми), а при други с постоянна мощност (например металорежещи машини). Изборът на метод за регулиране трябва да осигури работа на двигателя с номинално натоварване. Допустимото натоварване на двигателя се ограничава от неговото загряване. За пълно използване на двигателя, при различни регулировъчни характеристики и запазване на постоянни условия за охлажддане, е необходимо товарният ток да бъде равен на номиналния.

Глава 3

УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИГАТЕЛИ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

3.1. Основни зависимости на двигателите за постоянен ток

Аналитичният израз за механичната характеристика на двигателите за постоянен ток, може да се получи от уравнението за равновесие на електродвижещите напрежения (ЕДН) в котвената верига на въртящия се електродвигател. При установлен режим на работа, приложеното напрежение към изводите на двигателя се уравновесява с индуктираното в котвената намотка ЕДН и от спада на напрежението във веригата на котвата, т.е.

$$U = E + I_a R_a \quad 3.1$$

От теорията на електрическите машини е известно, че ЕДН на двигателя и развиваният от него електромагнитен момент се изразяват със следните равенства:

$$E = \frac{pN}{2\pi a} \Phi \omega = c \Phi \omega \quad 3.2$$

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c \Phi I_a \quad 3.3$$

където I_a е тока в котвената верига на двигателя, A;

R_a – съпротивлението на котвата, Ω ;

p – брой на чифтовете полюси на двигателя;

N – брой на активните проводници в котвената намотка;

a – брой на паралелните клонове на котвената намотка;

Φ – магнитен поток на двигателя, Wb;

ω – ъглова скорост на двигателя, rad/s.

Кофициентът с зависи от конструктивните данни на двигателя и изразен в мерни единици на международната измервателна система SI е равен на:

$$c = \frac{pN}{2\pi a}$$

Прието е да се използва параметърът ъглова скорост ω , изразен в rad/s, като физическа връзка с оборотите на въртене за минута - n , min^{-1} :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \text{rad/s}$$

и обратната зависимост,

$$n = \frac{60\omega}{2\pi}, \text{min}^{-1}$$

При заместване на ЕДН E , от равенство (3.2) в уравнение (3.1) и решението му относно скоростта ω , ще се получи изразът за електромеханичната характеристика $\omega = f(I)$:

$$\omega = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi} \quad 3.4$$

Уравнението за механичната характеристика $\omega = f(M)$ се намира, ако токът I_a , определен от (3.3) се замести в последният израз:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_a}{c^2\Phi^2} M \quad 3.5$$

Изразът (3.5) е валиден за всички двигатели за постоянен ток, независимо от начина на възбуждане.

Моментът M , който участва в горният израз, е електродвигателният момент на двигателя. В двигателен режим моментът на вала на двигателя е по-малък от електромагнитния, поради механични загуби и загуби в стоманата на котвата.

От изразът (3.5) се вижда, че механичните свойства на електродвигателите за постоянноен ток зависят от изменението на магнитния поток Φ , т.е. от начина на възбуждане на двигателя, следователно и от вида на естествената механична характеристика.

В зависимост от начина на свързване на възбудителната намотка към котвата, се различават следните видове двигатели:

а) *двигатели с независимо или паралелно възбуждане* - възбудителната намотка се включва паралелно на котвата или към независим източник за постоянноен ток. При тях магнитният поток не зависи от товара ($\Phi = \text{const}$) и следователно $\omega = \text{const}$, т.е. тези двигатели притежават *твърда* механична характеристика.

б) *двигатели с последователно възбуждане* - възбудителната намотка е включена последователно на котвата. Магнитният поток се променя при

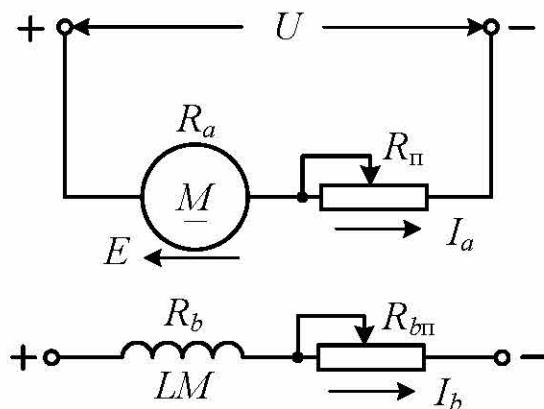
изменение на натоварването. Естествената механична характеристика на двигателя е мека.

в) *двигатели със смесено възбудждане* - имат две възбудителни намотки, едната от които е свързана паралелно, а другата последователно на котвата.

3.2. Механични характеристики на двигателите за постоянен ток с независимо възбудждане

При постояннотоковите двигатели с *независимо възбудждане*, възбудителната намотка на двигателя се захранва от независим източник на постоянно напрежение. Тази група включва и двигателите с *паралелно възбудждане*, т.к. паралелно включената възбудителна намотка се захранва от мрежата, като независим източник.

Принципната схема за включване на двигателя за постоянен ток с независимо възбудждане е показана на фиг.3.1.



Фиг.3.1. Електродвигател с паралелно или независимо възбудждане

При постоянен възбудителен ток ще остава неизменен и магнитният поток на двигателя, т.е. $\Phi = \text{const}$. Произведенето $c\Phi = k$ ще бъде постоянно по големина. От това следва, че електромеханичната и механичната характеристики на двигателя с независимо възбудждане ще бъдат представени с уравненията:

$$\omega = \frac{U}{k} - \frac{R_{a\Sigma}}{k} I_a \quad 3.6$$

$$\omega = \frac{U}{k} - \frac{R_{a\Sigma}}{k^2} M \quad 3.7$$

Сумарното съпротивление на котвената верига $R_{a\Sigma}$ е резултатното съпротивление от последователно включеното R_{Π} и съпротивлението на котвената намотка R_a , т.е.

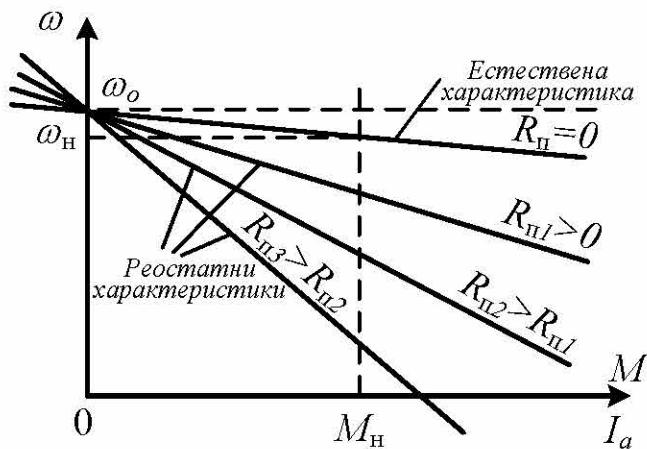
$$R_{a\Sigma} = R_a + R_{\Pi}$$

Естествената механична характеристика се описва с уравнението:

$$\omega = \frac{U}{k} - \frac{R_a}{k^2} M \quad 3.8$$

От равенства (3.6) и (3.7) се вижда, че характеристиките $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M)$ за двигател с независимо възбудждане, при постоянни U , $R_{a\Sigma}$ и Φ , са прави линии, съвпадащи с точност до константа.

На фиг.3.2 са показани механичните характеристики при $U = const$ и $\Phi = const$ за различни стойности на съпротивлението в котвената верига.



Фиг.3.2 Естествена и изкуствени механични характеристики ($R_{n1} < R_{n2} < R_{n3}$) за разглеждания електродвигател

От фиг.3.2 се вижда, че при $M = 0$, всички характеристики са с обща начална точка, разположена на координатната ос. Това показва, че скоростта на двигателя при $M = 0$, не зависи от големината на включеното в котвената верига съпротивление. Тази скорост ω_0 се нарича *скорост на идеален празен ход*. Тя се определя от уравнение (3.5) при $M = 0$:

$$\omega_0 = \frac{U}{c\Phi} = \frac{U}{k} \quad 3.9$$

При скоростта на идеален празен ход, т.к. токът $I_a = 0$, то ЕДН на двигателя се изравнява със захранващото напрежение.

Съгласно уравнение (3.7) наклонът на механичната характеристика се определя от стойността на съпротивлението $R_{a\Sigma}$, т.е. при увеличение, на наклона - твърдостта на характеристиките ще се намали. При реостатните характеристики големината на спада на скоростта се определя от стойността на допълнително включеното съпротивление R_n . Този спад на скоростта $\Delta\omega$, по отношение на скоростта на идеален празен ход ω_0 , се определя от втория член на уравнението на механичната характеристика:

$$\Delta\omega = \frac{R_a + R_n}{k^2} M \quad 3.10$$

Реостатните характеристики на двигателя за постоянен ток с независимо възбудждане, дадени на фиг.3.2, са по-меки от естествената.

На практика много често се налага да се промени *посоката на въртене*, т.е. двигателят да се реверсира. За да се осъществи това е необходимо да се измени

посоката на развиваният от него момент. Може да се постигне или чрез изменение на посоката на тока в котвата, или чрез изменение на посоката на магнитния поток, т.к. моментът на двигателя се определя от тези два параметъра ($M = c\Phi I_a$). Изменение в посоката на магнитният поток се постига чрез изменение посоката на тока във възбудителната верига на двигателя. Такова изменение не е препоръчително поради голямата индуктивност на възбудителната намотка и опасността в нея да се индуцира голямо ЕДН (пренапрежение) при изменение на магнитният поток. По тази причина реверсирането на двигатели за постоянен ток с независимо възбуждане се осъществява обикновено с изменение на посоката на тока в котвата.

Графичното изображение на механичната характеристика при обратна посока на въртене на електродвигателя е разположена симетрично в III-ти квадрант на координатната система и се изразява с уравнението:

$$\omega = -\omega_0 - \frac{R_{a\Sigma}}{k^2} M \quad 3.11$$

Поради линейният си характер, механичните характеристики на този двигател се построяват лесно, като се вземат две точно определени точки - точката която съответства на скоростта на идеален празен ход ($M = 0$ и $\omega = \omega_0$) и точката съответстваща на номиналният електромагнитен момент ($M = M_h$).

Първата точка е обща за всички характеристики (естествената и всички реостатни характеристики при $R_\pi = \text{var}$). За определянето ѝ се изхожда от каталожните данни за номиналните характеристики на двигателя (U_h, I_{ah} и ω_h). Съгласно уравнението за равновесие на ЕДН в котвената верига, номиналното електродвижещо напрежение на двигателя E_h се определя от равенството

$$E_h = k \omega_h = U - I_{ah} R_a \quad 3.12$$

Ако от това равенство се определи k и се замести в уравнение (3.9) за скоростта на идеален празен ход се получава:

$$\omega_0 = \omega_h \frac{U}{U - I_{ah} R_a} \quad 3.13$$

Когато активното съпротивление в котвената верига липсва в каталожните данни за двигателя, неговата стойност може да се изчисли от данните върху табелката на двигателя чрез уравнението:

$$R_a = \frac{0.5}{I_{ah}^2} (UI_{ah} - P_h) = 0.5(1 - \eta_h) \frac{U}{I_{ah}} \quad 3.14$$

Втората точка за естествената характеристика се определя от номиналният електромагнитен момент M_h , който съответства на номиналната скорост на двигателя ω_h . Тя е вписана в каталожните данни и върху табелката на двигателя. Номиналният момент се определя от равенството:

$$M_{\text{н}} = k I_{a\text{н}} = \frac{U}{\omega_0} I_{a\text{н}} \quad 3.15$$

Скоростта която съответства на номиналния електромагнитен момент при изкуствените (реостатни) характеристики $\omega_{\text{ин}}$ е по-малка от номиналната $\omega_{\text{н}}$. Тази скорост се получава от израза:

$$\omega_{\text{ин}} = \frac{E_{\text{ин}}}{k} = \frac{U - I_{a\text{н}}(R_a + R_{\pi})}{k}$$

Ако k се определи от уравнение (3.9), за $\omega_{\text{ин}}$ се получава:

$$\omega_{\text{ин}} = \omega_0 \frac{U - I_{a\text{н}}(R_a + R_{\pi})}{U} \quad 3.16$$

Чрез уравненията (3.15) и (3.16) може да се определи втората точка на изкуствената характеристика за всяка стойност на съпротивлението R_{π} .

3.3. Пускане и спиране на електродвигателите за постоянен ток с независимо възбуждане

Токът, който протича през котвената верига на двигателя с независимо възбуждане при развъртане двигател, се определя от равенството:

$$I_{a\text{н}} = \frac{U - E}{R_{a\Sigma}} \quad 3.17$$

При подаване на захранващото напрежение на двигателя, скоростта му е $\omega = 0$ и индукираното ЕДН $E = k\omega = 0$. В котвената верига на двигателя ще протече пусков ток I_{π} :

$$I_{\pi} = \frac{U}{R_{a\Sigma}} = \frac{U}{R_a + R_{\pi}} \quad 3.18$$

Ако в котвената верига няма включено допълнително съпротивление, т.е. $R_{\pi} = 0$, пусковият ток е много голям и се определя от равенството:

$$I_{\pi} = \frac{U}{R_a} \quad 3.19$$

Стойността на този пусков ток е в границите $(10 \div 50) I_{a\text{н}}$. Това налага той да бъде ограничен при пускането на двигателя, което се осъществява, чрез допълнително включени в котвената верига резистори, наречени *пускови*.

При развъртане на двигателя нараства и неговото ЕДН E , което съгласно уравнение (3.17) довежда до постепенно намаляване на пусковия ток. Това налага постепенно да се изключват резисторите, за да може двигателят да достигне естествената си механична характеристика, след завършване на пусковия процес. Изключването може да се осъществи плавно или на степени. Плавното изключване изисква голям брой секции на реостатите, което поради високата си цена и бавно действие има ограничено приложение. Изключването

на пусковия реостат на степени е свързано с колебания на пусковия ток и пусковия момент в определени граници. Реостатното пускане със степенно изключване на съпротивлението лесно може да се автоматизира, поради което е намерило най-широко приложение при двигателите за постоянен ток. Отделните степени на пусковия реостат се избират така, че пусковият ток и пусковият момент да се изменят в предварително зададени граници. За двигателите с нормално изпълнение те имат следните гранични стойности:

$$I_{\text{пп}1} = (2 \div 2.5)I_{\text{an}}$$

$$I_{\text{пп}2} = (1.2 \div 1.5)I_c$$

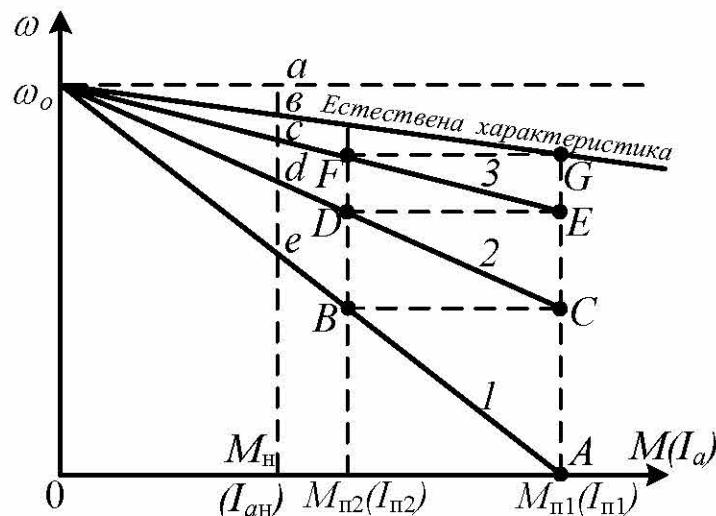
където $I_c = M_c/k$ е ток, съответстващ на съпротивителен момент M_c ;

$I_{\text{пп}1}$ - максимален пусков ток;

$I_{\text{пп}2}$ - ток на превключването (минимален пусков ток).

Максималният пусков момент ще бъде $M_{\text{пп}1} = (2 \div 2.5)M_c$, а моментът на превключване $M_{\text{пп}2} = (1.2 \div 1.5)M_c$.

На фиг.3.3 са показани механичните характеристики на работа на двигателя с тристепенен пусков реостат. Пусковият процес протича в следната последователност.



Фиг.3.3 Степени на пускане на електродвигател за постоянен ток с независимо възбудждане

Двигателят се развърта по реостатна характеристика 1 при пускане с трите включени резистора. Общото съпротивление $R_{a\Sigma} = R_a + R_1 + R_2 + R_3$ трябва да бъде разчетено така, че при скорост $\omega = 0$ токът да е със стойност $I_{\text{пп}1}$. С увеличаване на скоростта, токът в котвата намалява и при достигане на стойност $I_{\text{пп}2}$ (т. B) се изключва първата пускова степен - R_1 . Тя е подбрана така, че токът отново да нараства до стойност $I_{\text{пп}1}$. Тъй като времето за превключване е много малко, скоростта на двигателя се запазва (правата BC). Двигателят се развърта по реостатната характеристика 2, изключва се втората степен на

реостата и развъртането продължава по характеристика 3. След изключване и на третата степен на реостата, двигателят излиза на естествената си механична характеристика. При ток $I_{\text{п1}}$ и съответно момент $M_{\text{п1}}$ (т.Г). по естествената си характеристика двигателят се ускорява докато развиваният от него момент се изравни със статичният съпротивителен момент, т.е. $M = M_c$.

Графично или аналитично може да стане определянето на необходимия брой степени и големина на степените на пусковия реостат в представеният по-горе пусков процес.

Двигателят с независимо възбудждане освен в двигателен режим, може да работи и в спирачен. Той служи за намаляване на скоростта, пълно спиране на електrozадвижването или движение с постоянна скорост при въздействие на външни сили, например спускане на товар. При работа на двигателя в спирачен режим той създава спирачен момент.

Двигателите за постоянен ток с независимо възбудждане могат да работят в трите спирачни режима:

- генераторно спиране с отдаване на енергия в мрежата;
- спиране с противовключване;
- динамично спиране.

Генераторното спиране с отдаване на енергия в мрежата се получава, когато скоростта на двигателя стане по-голяма от скоростта на идеален празен ход, т.е. $\omega > \omega_0$. Това е възможно, ако на вала на двигателя постъпва съпосочен момент от производствения механизъм. В резултат на това ЕДН E на двигателя става по-голямо от приложеното напрежение U и двигателя работи в генераторен режим.

При $E > U$ токът в котвата на двигателя си променя своя знак:

$$I_a = \frac{U - E}{R_{a\Sigma}} = -\frac{E - U}{R_{a\Sigma}} \quad 3.20$$

а от там и посоката на развивания от него момент. Преобразува се и механичната енергия, подавана към вала на двигателя, от механизма в електрическа. Двигателят развива спирачен момент:

$$M_{\text{сп}} = c\Phi(-I_a) = -c\Phi I_a = -kI_a \quad 3.21$$

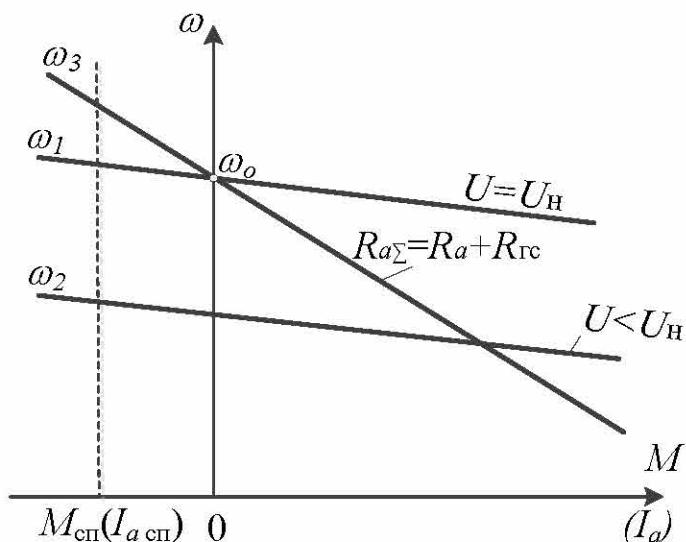
Преминаването от двигателен режим в спирачен става само за сметка на създаването от механизма към вала на допълнителен момент. Уравнение (3.5) за механичната характеристика е валидно и за този спирачен режим. Ако се вземе предвид и знака на момента, при $\omega > \omega_0$, то уравнението на механичната характеристика се получава в следния вид:

$$\omega = \frac{U}{k} + \frac{R_{a\Sigma}}{k^2} M_{\text{сп}} \quad 3.22$$

От уравнение (3.22) се вижда, че механичната характеристика на двигателя с независимо възбудждане е продължение на характеристиката за двигателен режим във II-ри квадрант (фиг.3.4), т.к. $\omega > \omega_0$ и $M < 0$.

Скоростта, с която се осъществява генераторното спиране при един и същи спирачен момент $M_{сп}$, може да се променя чрез използване на изкуствени механични характеристики. При спирачен момент $M_{сп}$ на електродвигателя, той се върти със скорост ω_1 , когато работи на естествената си характеристика. При увеличаване на активното съпротивление в котвената намотка и неизменен спирачен момент се повишава скоростта ω_3 в режим на генераторно спиране. Той се използва като начин за регулиране на скоростта чрез изменение на захранващото напрежение. Преминаването към по-ниско напрежение е свързано с намаляване на скоростта на идеален празен ход и изпълнение на условието $\omega_2 < \omega_0$.

Главен недостатък на генераторното спиране е, че не може да се осъществи спиране до скорост равна на нула.



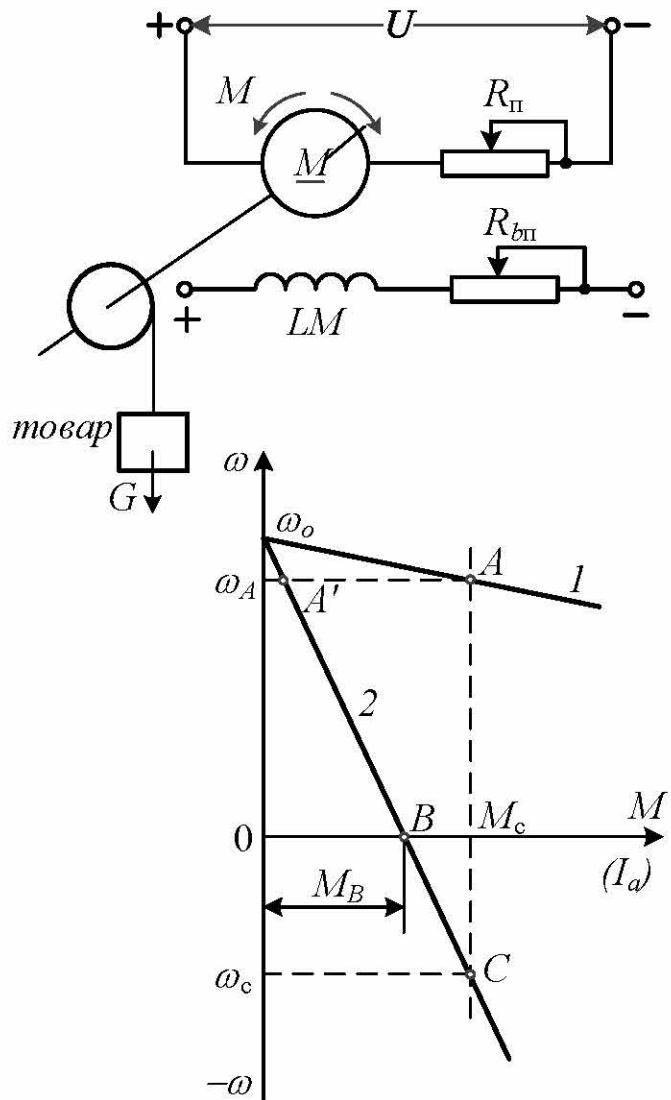
Фиг.3.4 Генераторно спиране при естествена и изкуствени механични характеристики

Спиране с противовключване се осъществява, когато двигателят е включен в мрежата и се върти в определена посока, но под въздействие на външен момент или инерционните сили, котвата се върти в обратна посока.

Режимът на спиране с противовключване се осъществява по два начина:

- чрез включване на голямо допълнително съпротивление в котвената верига на двигателя;
- чрез промяна на поляритета на напрежението, захранващо котвената верига на двигателя.

Първият начин е възможен при наличие на активен статичен момент на вала на двигателя, например при подемен механизъм (фиг.3.5).



Фиг.3.5 Спиране с противовключване при активен M_c

Ако двигателят работи на естествената си механична характеристика 1, неговата скорост е ω_A и товарът се издига. Двигателят преминава върху изкуствена характеристика 2 при включване на допълнително, достатъчно голямо, съпротивление в котвената верига. В началният момент ще работи в т. A' от тази характеристика. В т. A' моментът, развиен от двигателя, е по-малък от съпротивителния момент M_c и скоростта намалява.

В т. B двигателят ще спре за момент, но т.к. $M < M_c$ и под действието на товара ще се развърти в обратна посока. Той ще работи върху частта от характеристиката си, разположена в IV-ти квадрант, т.е. ще премине в режим на противовключване. В т. C ще се установи равновесие на двигателния и съпротивителния момент $M = M_c$, и товарът вместо да се издига ще се спуска с установената скорост ω_c .

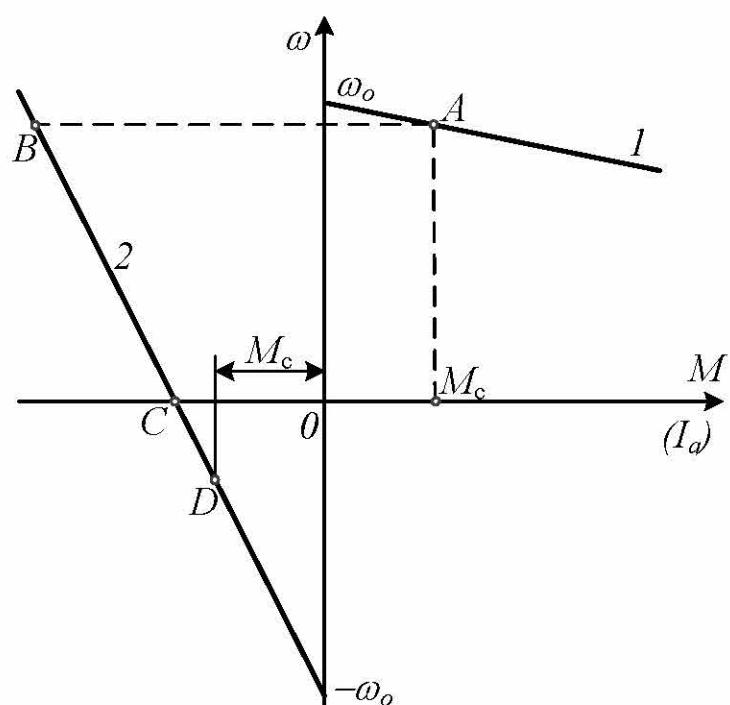
Работата на изкуствената характеристика 2 в двигателен и в режим на противовключване се изразява с едно общо уравнение:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_{a\Sigma}}{k^2} M \quad 3.23$$

зашто при преминаване от единия в другия режим не се извършват промени в схемата.

Режимът на противовключване чрез промяна на поляритета на захранващото напрежение на котвата се използва главно при механизми с реактивен съпротивителен момент. Тогава под въздействие на запасената кинетична енергия във въртящите се части, двигателят продължава да се върти в предишната посока, въпреки че неговата котвена намотка е включена за обратна посока на движение. Следователно, след превключване двигателят известно време ще работи в режим на противовключване.

На фиг.3.6 са показани механичните характеристики за този случай.



Фиг.3.6 Спиране с противовключване при реактивен M_c

В първия момент на превключването двигателят, който работи на характеристика 1, съответстваща на двигателен режим в т.А, преминава на работа в т.В на характеристика 2 във II^{ри} квадрант. Поради инерцията на движещите се части на механизма в началният момент, скоростта остава неизменна, а моментът, развиван от двигателя, сменя знака си. Следователно, в т.В двигателят работи в режим на противовключване. Под въздействие на сумата от съпротивителния момент M_c и спирачния момент $M_{сп}$ на двигателя, скоростта намалява до nulla.

Участъкът ВС от характеристиката съответства на режима на противовключване на двигателя. При скорост равна на nulla ($\omega = 0$, т.С на фиг.3.6), моментът на двигателя е по-голям от статичният момент ($M > M_c$), вследствие на което, двигателят ще обърне своята посока. В този случай той може да се спре, като в т.С се изключи от захранващата мрежа и се задържи с

механична спирачка. Ако съпротивителният момент M_c при скорост на двигателя $\omega = 0$ е по-голям от двигателният M , няма да се осъществи реверсиране на двигателя.

В режим на спиране с противовключване двигателят се върти в посока обратна на разливания от него момент, т.к. магнитният поток запазва посоката си. При промяна посоката на скоростта ЕДН E променя своя знак и става съпосочено с напрежението на мрежата. Това обуславя протичането на голям ток в режим на противовключване:

$$I_{a\text{сп}} = \frac{U + E}{R_{a\Sigma}} \approx \frac{2U}{R_{a\Sigma}}$$

За да се ограничи този ток, е необходимо в котвената верига да се включи достатъчно голям резистор. Спирането с противовключване е свързано със значителни загуби на енергия, но се използва за бързо спиране и развъртане в обратна посока.

Режимът на *динамично спиране* на двигателя с независимо възбудждане се осъществява, когато котвата на двигателя се изключи от мрежата и се затвори през определено съпротивление R_{dc} , което ограничава тока в котвата. Възбудителната намотка остава включена към захранващата мрежа. В този спирачен режим, под действието на запасената кинетична енергия или на активният момент на механизма, двигателят работи като генератор с независимо възбудждане върху външно съпротивление. Развиваният от двигателя момент се противопоставя на движението, т.е. той е спирачен. Токът и моментът в котвената верига зависят само от ЕДН E , а знакът му се запазва и се определя от изразите:

$$I_a = \frac{-E}{R_{a\Sigma}} - \frac{k \omega}{R_{a\Sigma}} \quad 3.24$$

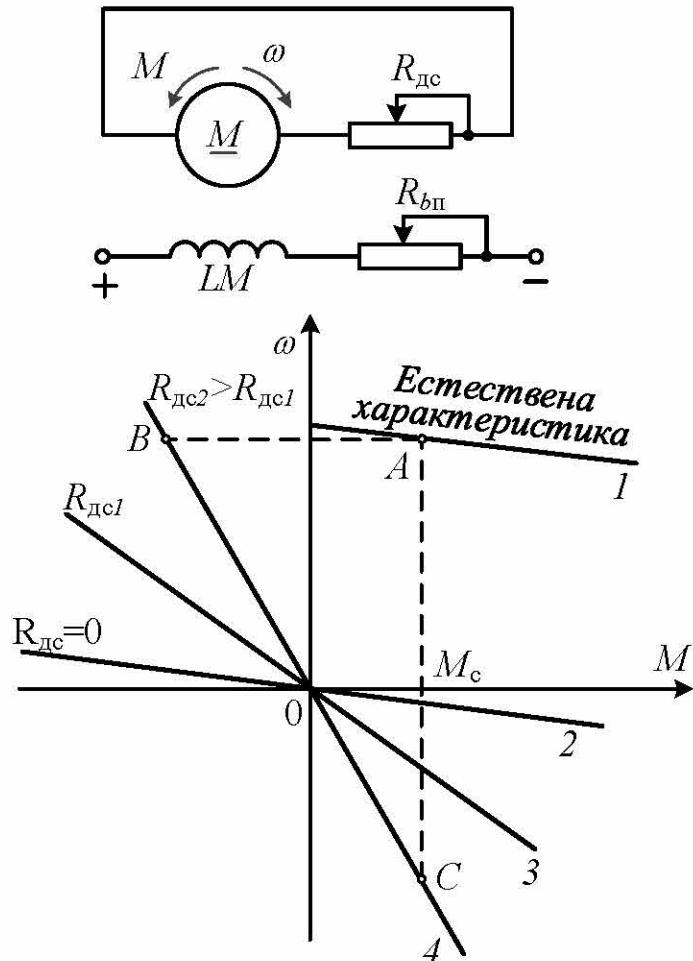
$$M_{\text{сп}} = k I_a = -\frac{k^2 \omega}{R_{a\Sigma}} \quad 3.25$$

При решение на изрази (3.24) и (3.25) по отношение на скоростта ω се получават уравнения на електромеханичната и механичната характеристики на двигателя в режим на динамично спиране:

$$\omega = -\frac{R_{a\Sigma}}{k} I_a = -\frac{R_{a\Sigma}}{k^2} M_{\text{сп}} \quad 3.26$$

От уравнение (3.26) се вижда, че характеристиките на двигателя при динамично спиране са прави линии, които преминават през началото на координатната система и са разположени във II-ри и IV-ти квадрант. Наклонът на характеристиките се определя от стойността на общото съпротивление в котвената верига. На фиг.3.7 са показани механичните характеристики при динамично спиране за различно съпротивление R_{dc} в котвената верига.

Превключването от двигателен в режим на динамично спиране съответства на преминаването от т.*A* (на характеристика 1) в т.*B* (на характеристика 4) и моментът разиван от двигателя става спирачен.



Фиг.3.7. Динамично спиране при електродвигател за постоянен ток с независимо възбудждане

При реактивен статичен момент двигателят, който развива спирачен момент, ще намали скоростта си по механична характеристика 4 до $\omega = 0$ и ще спре. Ако моментът на механизма е активен след достигане на скорост $\omega = 0$, механичната система се развърта в обратна посока под действието на активният статичен момент M_c до настъпване на равновесие $M = M_c$ в т.*C*. В режим на динамично спиране механичната енергия, подавана към вала на двигателя, се преобразува в електрическа и се отделя под формата на топлина в съпротивленията на котвената верига. При нереверсивни електrozадвижвания по-често се използва режимът на динамично спиране, т.к. при него не се черпи енергия от мрежата.

3.4. Електромеханични свойства на електродвигателите за постоянен ток с последователно възбуждане. Пускане, спиране и реверсиране

Двигателят с последователно възбуждане се характеризира с това, че възбудителната намотка е свързана последователно с котвената. Токът във възбудителната намотка I_b е равен на тока в котвената намотка I_a , вследствие на което магнитният поток Φ на този двигател зависи от натоварването на двигателя, т.е. $\Phi = f(I_a)$.

Уравнения (3.4) и (3.5) за електромеханичната и механичната характеристики са валидни и за двигателя с последователно възбуждане, наричан още *сериен двигател*. Тези уравнения обаче не могат да се използват, т.к. няма точен аналитичен израз за кривата на намагнитване $\Phi = f(I_a)$.

Ако се пренебрегне насищането на магнитната система и влиянието на реакцията на тока на котвата, тогава тази зависимост ще бъде линейна, т.е. $\Phi = aI_a$. В този случай за момента, развиwan от двигателя, се получава изразът:

$$M = c\Phi I_a = caI_a^2 = bI_a^2 \quad 3.27$$

където $a = \Phi/I_a$ и $b = ca$ са постоянни коефициенти

$$\text{то } I_a = \sqrt{\frac{M}{b}} \text{ и } \Phi = a\sqrt{\frac{M}{b}}$$

От израза (3.27) се вижда, че въртящият момент на двигателя за постоянен ток с последователно възбуждане е пропорционален на квадрата на тока в котвата, което определя по-добрите тягови свойства на този тип двигатели.

Когато се замести стойността на магнитният поток Φ в общото уравнение за движение на двигателя за постоянноен ток (3.5), то механичната характеристика на двигателя с последователно възбуждане се описва с израза:

$$\omega = \frac{U}{ca\sqrt{\frac{M}{b}}} - \frac{R_d b}{c^2 a^2} = \frac{A}{\sqrt{M}} - B \quad 3.28$$

където A и B са постоянни коефициенти;

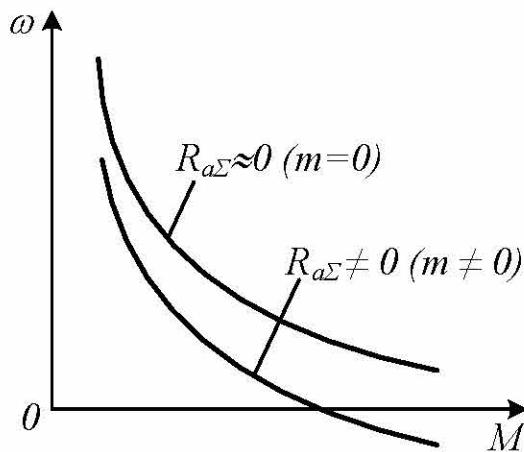
$$A = \frac{U\sqrt{b}}{ca} = \frac{U}{\sqrt{b}}$$

$$B = \frac{bR_d}{c^2 a^2} = \frac{R_d}{b}$$

$R_d = R_a + R_b$ - съпротивление на двигателя.

Следователно, получените механични характеристики (естествени и изкуствени) в линейният участък на кривата на намагнитване $\Phi = f(I_a)$ имат хиперболичен характер.

Съвременните двигатели с последователно възбудждане при номинално натоварване са с чувствителна магнитна система. Затова хиперболичната зависимост между ω и M е валидна само за малки стойности на момента. При стойности на момента над номиналния, магнитната система се насища и магнитният поток остава постоянен, а механичната характеристика става линейна. Общий вид на механичната характеристика е показан на фиг.3.8.



Фиг.3.8 Механични характеристики на електродвигател за постоянен ток с последователно възбудждане

От уравнение (3.28) и от фиг.3.8 се вижда, че скоростта на двигателя при малки натоварвания рязко нараства, като при идеален празен ход ($M = 0$) теоретически се стреми към безкрайност. Това определя **недопустимостта** двигателят за постоянен ток с последователно възбудждане да работи на празен ход. На практика трябва $R_{a\Sigma} \neq 0$.

Поради невъзможността да се получи аналитичен израз за механичната характеристика на двигателя с последователно възбудждане за целия диапазон на изменение на момента, тя се построява по графични и графоаналитични методи. За целта се използват експериментално снети зависимости $\omega = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$, които за записани в каталозите на всеки двигател. В справочната литература те са представени във вид на универсални криви в относителни единици.

Един сравнително удобен начин за построяване на реостатните (изкуствени) характеристики на двигателя с последователно възбудждане е използването на изразите за естествената и за реостатната характеристики:

$$\omega_e = \frac{U - I_a R_d}{c\Phi} \quad 3.29$$

$$\omega_u = \frac{U - I_a R_{a\Sigma}}{c\Phi} \quad 3.30$$

където $R_{a\Sigma} = R_a + R_b + R_\pi = R_\Delta + R_\pi$ – пълно съпротивление в котвената верига.

Ако се раздели (3.30) на (3.29) се получава

$$\frac{\omega_i}{\omega_e} = \frac{U - I_a(R_\Delta + R_\pi)}{U - I_a R_\Delta}$$

или

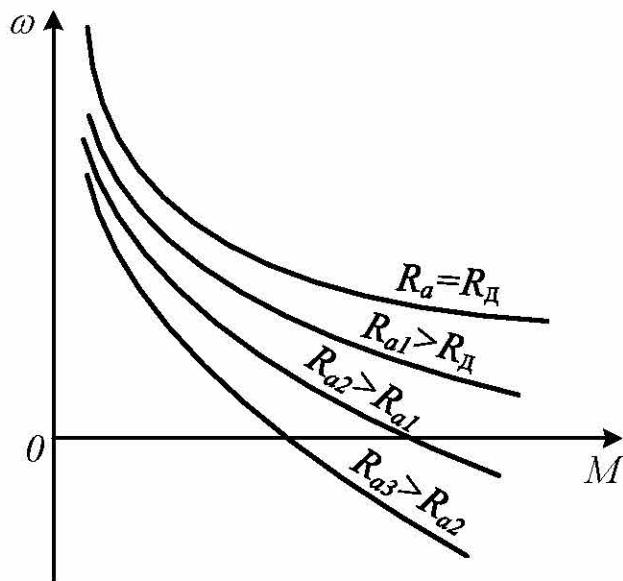
$$\omega_i = \omega_e \frac{U - I_a(R_\Delta + R_\pi)}{U - I_a R_\Delta} \quad 3.31$$

При построяване на изкуствена реостатна характеристика за определено допълнително съпротивление R_π се задават различни стойности на тока I_{ai} и се определят съответните стойности ω_{ei} от естествената характеристика. От уравнение (3.30) се изчисляват стойностите на скоростта ω_{ii} за изкуствената характеристика. С получените точки (I_{ai}, ω_{ii}) се построява характеристика $\omega_i = f(I_a)$. Когато съпротивлението на двигателя R_a не е дадено, то може да се определи от зависимостта:

$$R_a = 0.75(1 - \eta_h) \frac{U_h}{I_{ah}}$$

От построена изкуствена характеристика $\omega_i = f(I_a)$ и зависимостта $M = f(I_a)$ може да се построи съответната реостатна механична характеристика $\omega_i = f(M)$.

На фиг.3.9 са показани механични характеристики на двигателя с последователно възбудждане за различни стойности на съпротивлението в котвената верига.



Фиг.3.9 Механични характеристики на двигател за постоянно ток с последователно възбудждане при различни стойности на съпротивлението

Изкуствените реостатни характеристики на двигателя с последователно възбудждане са значително по-меки от естествената.

Реверсирането на двигателя за постоянен ток с последователно възбудждане се осъществява, като се смени поляритета на котвената намотка при запазване на посоката на тока във възбудителната намотка. Необходимо е да се знае, че двигателят с последователно възбудждане може да се реверсира само при реактивен статичен момент, т.к. при активен статичен момент и смяна в посоката на въртене, скоростта би нараснала недопустимо много.

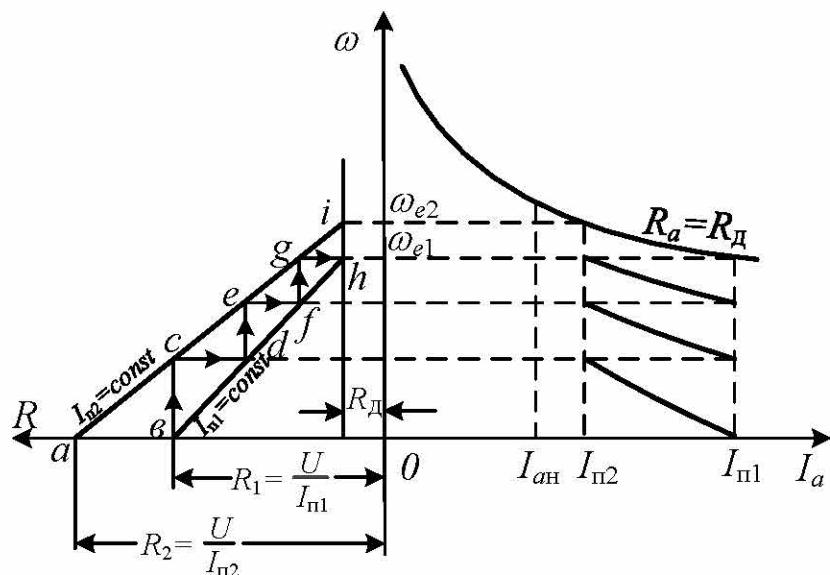
Най-разпространеният начин за пускане на двигателя за постоянен ток с последователно възбудждане е реостатното пускане. За изчисляване на пусковите му съпротивления се използва най-често графичен метод.

Графичният метод се базира на това, че при постоянен ток в котвената верига $I_a = \text{const}$ ($\Phi = \text{const}$) скоростта на двигателя е линейна функция от съпротивлението в котвената верига $\omega = f(R_{a\Sigma})$ съгласно израза:

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{a\Sigma} I_a}{c\Phi} = C - DR \quad 3.32$$

Графичното построяване се извършва в следната последователност:

В I-я квадрант на координатната система (фиг.3.10) по каталожни данни се построява естествената електромеханична характеристика $\omega = f(I_a)$ и се избират стойности на пусковия ток $I_{\text{п1}}$ и на тока на превключване $I_{\text{п2}}$.



Фиг.3.10 Електромеханични характеристики на двигател за постоянен ток с последователно възбудждане при степенно пускане

Във II-я квадрант се нанасят зависимостите $\omega = f(R_a)$ за ток $I_{\text{п1}} = \text{const}$ и при ток $I_{\text{п2}} = \text{const}$. Следователно, зависимостта $\omega = f(I_a)$ при токове $I_{\text{п1}} = \text{const}$ и $I_{\text{п2}} = \text{const}$ могат да бъдат построени по две точки. Тези точки са:

- при ток $I_{\text{п1}} = \text{const}$ т.в с координати $\omega_0; R_a = R_1 = \frac{U}{I_{\text{п1}}}$ и т.г с координати $R_a = R_{\Delta}; \omega = \omega_{e1}$.

- при ток $I_{\text{п}2} = \text{const}$ т.а с координати $\omega = 0$; $R_a = R_2 = \frac{U}{I_{\text{п}2}}$ и т.и с координати $R_a = R_d$; $\omega = \omega_{e2}$.

Скоростите ω_{e1} и ω_{e2} са определени от естествената характеристика ($R_a = R_d$) при токове $I_{\text{п}1}$ и $I_{\text{п}2}$.

Графичното построение се счита за завършено, ако след изключване на последната пускова степен двигателят преминава върху естествената си характеристика при ток $I_a = I_{\text{п}1}$. Ако това не се осъществи се избират нови стойности за $I_{\text{п}1}$ и $I_{\text{п}2}$ и графичното построение се повтаря.

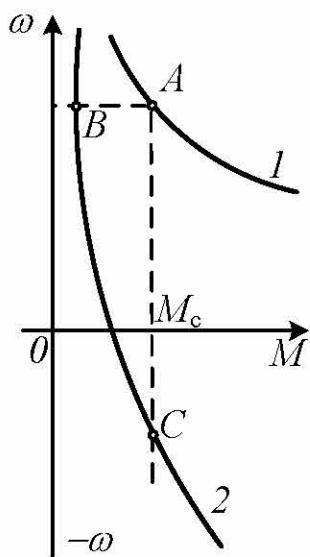
При двигателеля за постоянен ток с последователно възбудждане са възможни само два спирачни режима:

- спиране с противовключване;*
- динамично спиране.*

Генераторното спиране с отдаване на енергия в мрежата, при нормална схема на включване, не може да се осъществи, т.к. с намаляване на котвения ток I_a , намалява магнитния поток и скоростта на двигателя се увеличава недопустимо. Такъв режим с отдаване на енергия в мрежата е възможен само при специални схеми на включване.

Спирането с противовключване е основен спирачен режим за двигателя с последователно възбудждане, както за механизмите с активен статичен момент, така и за механизмите с реактивен статичен момент.

Режимът на противовключване на този двигател се осъществява или чрез включване на голямо допълнително съпротивление в котвената верига или чрез реверсиране на двигателя фиг.3.11.

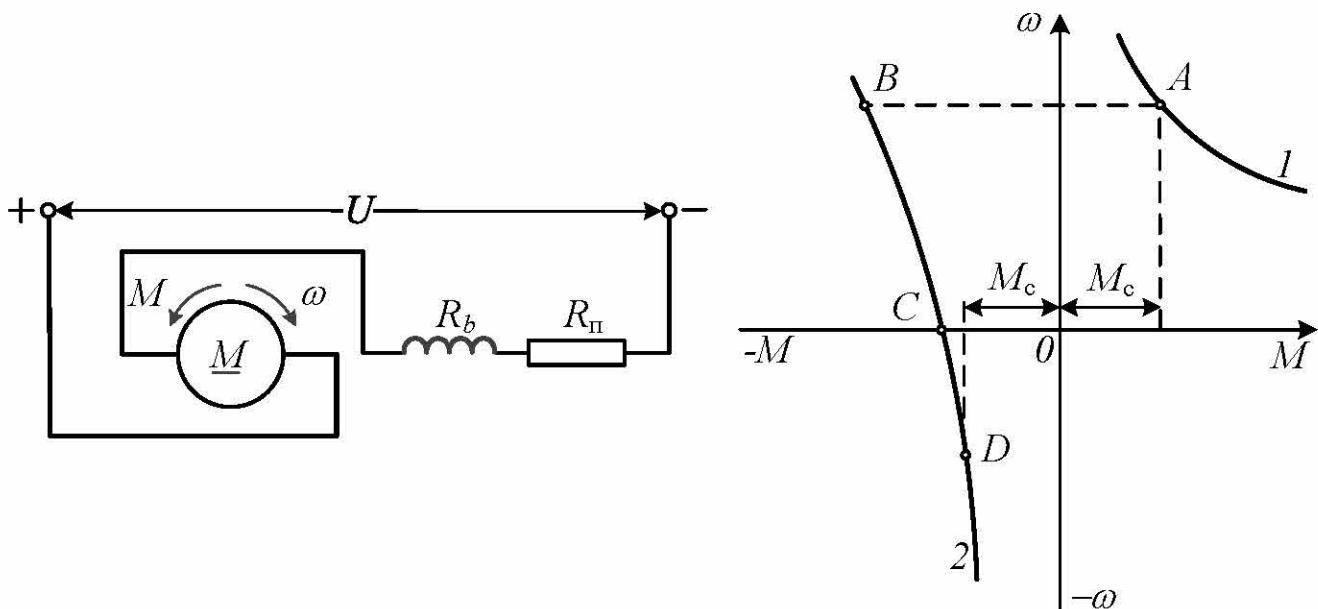


Фиг.3.11 Спиране с противовключване на двигател за постоянен ток с последователно възбудждане и активен статичен момент

Преминаване в режим на противовключване чрез включване на голямо допълнително съпротивление в котвената верига е възможно само при

механизми с активен съпротивителен момент. Електроздвижването от двигателен режим в т.А на характеристика 1, преминава в спирачен режим в т.В на характеристика 2 след включване на допълнително съпротивление. Това е така, защото двигателният момент е по-малък от статичния. При нулева скорост статичният момент все още е по-голям и двигателят ще обърне посоката си на въртене и новото равновесно състояние ще настъпи в т.С. Този начин се използва за спирачно спускане на товари при подемни механизми.

При механизмите с реактивен статичен момент спирането с противовключване може да се осъществи като се измени поляритетът на котвената намотка. Това променя посоката на тока и знака на двигателния момент, фиг.3.12. След превключването на поляритета на котвата, задвижването от т.А и двигателен режим на характеристика 1, преминава в спирачен режим в т.В на характеристика 2.



Фиг.3.12 Схема на свързване и механична характеристика при спиране с противовключване на двигател за постоянен ток с последователно възбуждане при реактивен товар

Двигателят спира, защото развиваният от него момент действа против движението. При нулева скорост, в т.С, трябва да се изключи от мрежата в противен случай ще промени посоката си на въртене и ще се установи да работи в т.Д на характеристиката, когато $M = M_c$.

Електродинамичното спиране на двигател за постоянен ток с последователно възбуждане може да се осъществи по два начина:

- динамично спиране със самовъзбуждане;
- динамично спиране с независимо възбуждане.

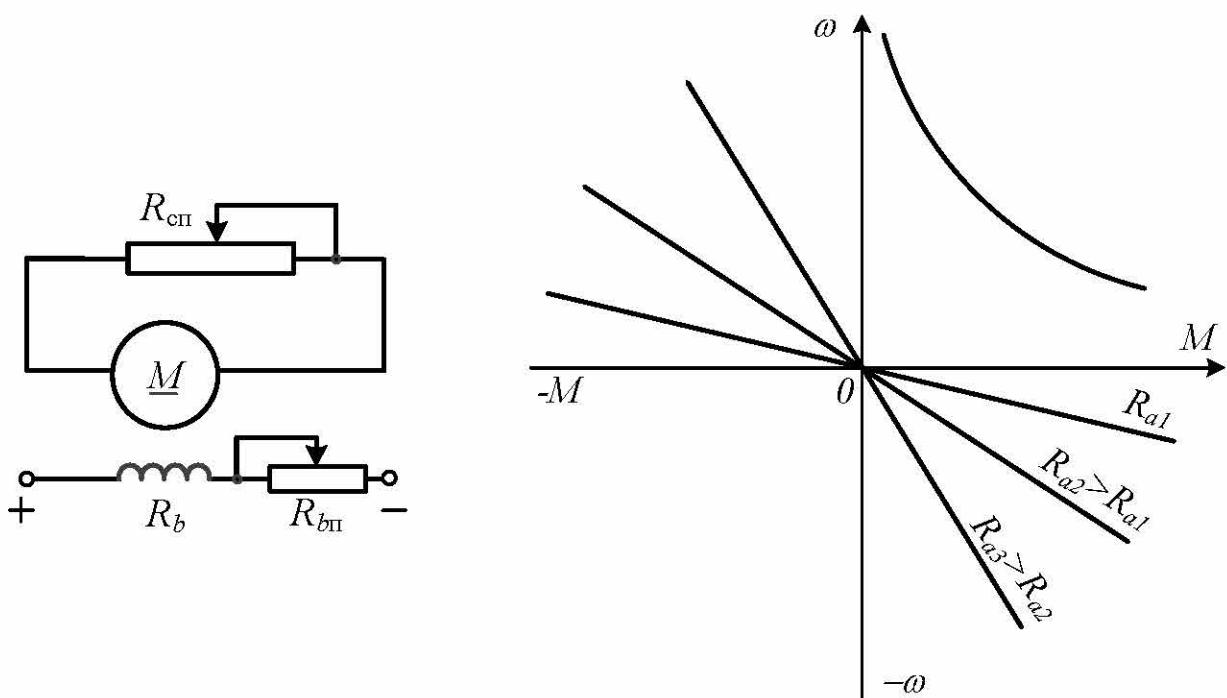
При динамичното спиране със самовъзбуждане двигателят се изключва от мрежата, затваря се през спирачно съпротивление $R_{\text{сп}}$ и работи като генератор със самовъзбуждане.

При превключване от двигателен режим на динамично спиране със самовъзбуждане е необходимо да се смени поляритетът на котвената или възбудителната намотка, за да не се размагнити машината. За да се получи самовъзбуждане, ЕДН на машината трябва да е по-голямо от пада на напрежението в спирачната верига, т.е.

$$E = -I_a(R_a + R_b + R_{\text{п}}) > 0 \quad 3.33$$

Двигателят се самовъзбужда едва при достигане на определена скорост, за дадено съпротивление в котвената верига, след което развива спирачен момент. За скоростта, при която започва интензивно самовъзбуждане, спирачният момент нараства скокообразно. Това води до недопустими динамични натоварвания в механизма и предавката. Затова динамичното спиране със самовъзбуждане се използва главно като аварийно спиране.

За да се получи по-голяма плавност при спиране, се използва *динамично спиране с независимо възбуждане*. Тук възбудителната намотка се включва към независима мрежа на захранване с включено последователно съпротивление $R_{b\text{п}}$, а котвата се затваря през спирачно съпротивление $R_{\text{сп}}$. Двигателят с последователно възбуждане по тази схема работи, като двигател с независимо възбуждане, затова механичните му характеристики са прави линии, което се вижда на фиг.3.13 при различни стойности на съпротивлението $R_{\text{сп}}$ в котвената верига.



Фиг.3.13 Динамично спиране на двигател за постоянен ток с последователно възбуждане превключчен в схема с независимо възбуждане

Основен недостатък на схемата с независимо възбудждане е голямата консумирана мощност в резултат на проприращия голям ток през възбудителната намотка.

3.5. Електромеханични свойства на двигателите за постоянен ток със смесено възбудждане

Двигателят за постоянен ток със смесено възбудждане притежава две възбудителни намотки - независима и последователна, които създават магнитния поток.

$$\Phi = \Phi_{\text{H}} \pm \Phi_{\text{P}} = c_1(\omega_{\text{H}} I_b \pm \omega_{\text{P}} I_a) \quad 3.34$$

Двете възбудителни намотки могат да бъдат включени по такъв начин, че създадените от тях магнитни потоци Φ_{H} и Φ_{P} да се съпосочни (знакът „+“ в уравнение (3.34)) или противопосочни (знак „-“). В първия случай двигателят се нарича *компаунден*, а във втория - *противокомпауден*. При противокомпаундните двигатели с увеличаване на натоварването нараства и потокът от последователната възбудителна намотка, а от там и увеличаване на скоростта. Двигател с нарастваща механична характеристика не може да работи устойчиво на празен ход и при постоянен съпротивителен момент. Затова главно приложение са намерили компаундните двигатели, при който въртящият момент е:

$$M = c\Phi I_a = c(\Phi_{\text{H}} + \Phi_{\text{P}} I_a)I_a \quad 3.35$$

За не насилената магнитна система на електродвигателя е в сила зависимостта:

$$M = a_1 I_a + b I_a^2 \quad 3.36$$

където $a_1 = c\Phi_{\text{H}}$ и $b = ca$ са постоянни коефициенти, изразяващи връзката между тока и момента.

Уравнението за електромеханичната характеристика на компаундния двигател при не насилената магнитна система е:

$$\omega = \frac{U}{a_1 + aI_a} - \frac{R_a I_a}{a_1 + aI_a} \quad 3.37$$

От уравнение (3.37) следва, че компаундният двигател има скорост на идеален празен ход, която се определя от потока на независимата възбудителна намотка и не зависи от съпротивлението включено в котвената верига:

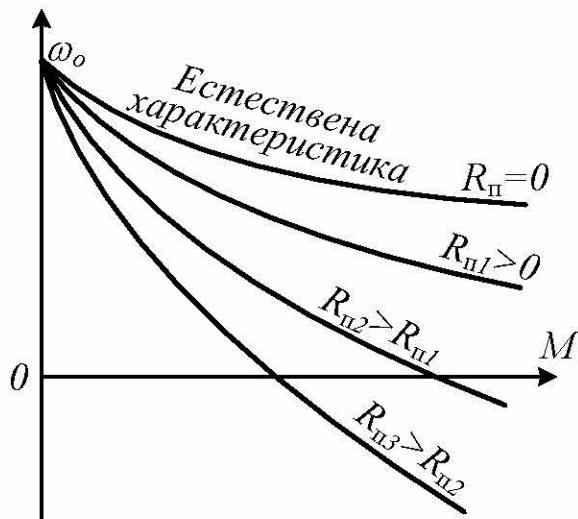
$$\omega_0 = \frac{U}{c\Phi_{\text{H}}} = \frac{U}{a_1}$$

При натоварване магнитният поток, създаван от последователната намотка, а следователно и общият магнитен поток се изменя. Вследствие на това, за построяване на естествената механична характеристика на компаундния

двигател се използват универсални характеристики $\omega = f(I_a)$ и $M = f(I_a)$, дадени от производителя.

Реостатните механични характеристики и пусковия реостат за компаундния двигател се изчисляват с помощта на методите, използвани при двигатели с последователно възбудждане.

На фиг.3.14 са показани механични характеристики на компаунден двигател при различни стойности на съпротивлението R_{π} , включено в котвената верига.



Фиг.3.14 Механични характеристики при смесено възбудждане ($R_{\pi 3} > R_{\pi 2} > R_{\pi 1}$)

От показаните механични характеристики се вижда, че скоростта на разглеждания електродвигател в зоната на малките натоварвания се изменя чувствително, а след това характеристиката преминава в права линия, както при двигателя с независимо възбудждане. Това се обяснява със значителното влияние на магнитният поток от последователната намотка в не насищена магнитна система на двигателя. При големи натоварвания машината се насища и потокът остава постоянен.

Пускането на двигателя със смесено възбудждане е почти аналогично на разгледаните преди това постояннотокови двигатели.

Двигателят със смесено възбудждане се реверсира, чрез изменение на поляритета на котвената намотка.

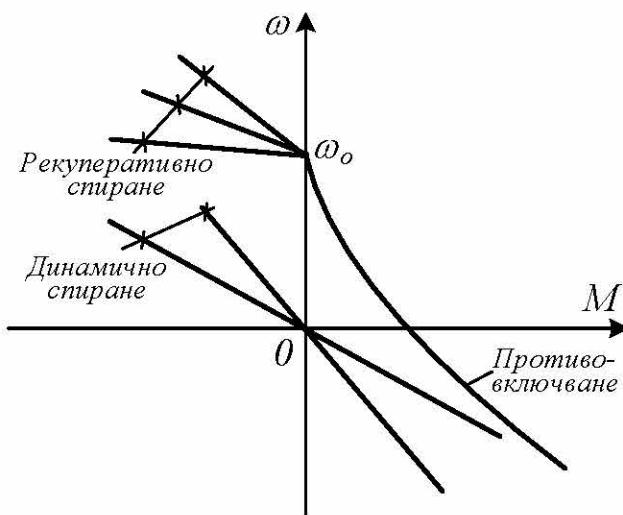
При тези двигатели са възможни трите спирачни режима:

- генераторно спиране с отдаване на енергия в мрежата;
- спиране с противовключване;
- динамично спиране.

Механичните характеристики на двигател в тези режими са показани на фиг.3.15. Генераторното спиране с отдаване на енергия в мрежата се получава, когато скоростта на двигателя превиши скоростта на идеален празен ход $\omega > \omega_0$. Тогава ЕДН става по-голямо от напрежението на мрежата, в резултат

на което токът и моментът изменят знаците си, т.е. от двигателни се превръщат спиращи. Едновременно с това токът в последователната възбудителна намотка сменя посоката си и започва да оказва размагнитващо влияние. Ето защо, с увеличаване на тока спирачният момент нараства много бавно. Това налага, при преминаване в генераторен режим, последователната възбудителна намотка да се изключи и машината да работи с независимо възбуждане. Механичните характеристики са прави линии.

Спиране с противовключване, при активен момент, се осъществява, като последователно в котвената намотка се включи резистор с голямо съпротивление R_{π} .



Фиг.3.15 Механични характеристики в спирачен режим на постояннотоков двигател със смесено възбуждане

Динамичното спиране на двигателя със смесено възбуждане може да бъде осъществено с двете възбудителни намотки или най-често с изключена последователна намотка. Този спирачен режим се осъществява, както при другите постояннотокови двигатели - котвената намотка се изключва от захранващата мрежа и се затваря през спирачно съпротивление $R_{\text{сп}}$. На фиг.3.15 са показани характеристиките при динамично спиране с изключена последователна намотка.

3.6. Регулиране на скоростта на въртене на двигателите за постоянен ток

От аналитичният израз за механичните характеристики на двигателя за постоянен ток

$$\omega = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_a \Sigma}{c^2 \Phi^2} M \quad 3.38$$

се вижда, че скоростта може да се регулира чрез:

- а) изменение на съпротивлението в котвената верига $R_{a\Sigma}$;
- б) изменение на магнитният поток Φ ;
- в) изменение на захранващото напрежение U .

Първите два начина са свързани с изменение на едни или други параметри на електродвигателите или техните вериги. Наричат се параметрични методи за регулиране на скоростта на електrozадвижването. При третият начин регулирането на скоростта на въртене, се постига чрез изменение на напрежението U от захранващите източници на енергия.

Следва да се отбележи, че регулируемите параметри на електрическите вериги или стойностите на напреженията от захранващите източници на енергия могат да остават постоянно зададени по време или периодично да се изменят със зададена средна стойност. В първия случай, говорим за начин за *непрекъснато регулиране на скоростта*, а във втория за *импулсно регулиране на скоростта*.

3.6.1. Регулиране на скоростта на въртене на електrozадвижването, чрез изменение на съпротивлението в котвената верига на двигателя

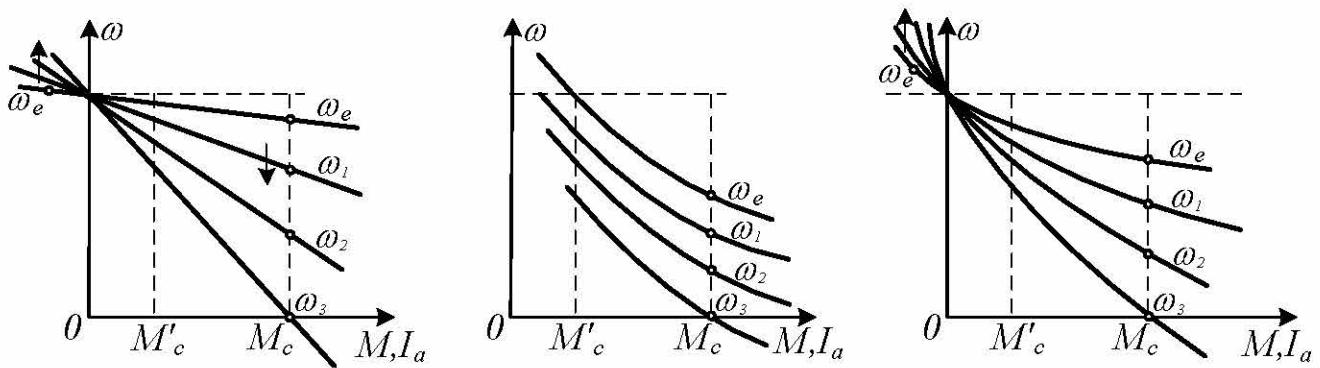
Съпротивлението $R_{a\Sigma}$ на котвената верига, може да се изменя, като се променя допълнителното външно съпротивление R_π , включено в тази верига. При това двигателите за постоянен ток работят на регулируеми механични реостатни характеристики. Видът на реостатните характеристики за трите вида двигатели е показан на фигури фиг.3.2, фиг.3.8 и фиг.3.14

При този начин на регулиране, скоростта се изменя под естествената характеристика. С увеличаване на съпротивлението твърдостта на характеристиката намалява, а от там и стабилната работа при зададена скорост.

Диапазонът на регулиране на скоростта зависи от големината на съпротивителния момент M_c , фиг.3.16. На фигурата е показано изменението на скоростта на трите вида двигатели - с независимо, с последователно и смесено възбудждане при еднотипно натоварване.

Диапазонът на регулиране не превишава $(2\div 3):1$ и при едно и също външно съпротивление R_π той е толкова по-малък, колкото по-малко е натоварването. Скоростта на празен ход практически не може да се регулира и е определена от конструкцията на двигателя.

При двигатели с независимо и смесено възбудждане и статичен момент $M_c \rightarrow 0$ изменението на скоростта е $\Delta\omega \rightarrow 0$.



Фиг. 3.16 Изменение на скоростта при двигатели – с независимо, с последователно и смесено възбуждане

Двигателите с последователно възбуждане, при малки натоварвания и големи стойности на съпротивлението в котвената верига, ще зависят значително от голямата скорост $M_c \rightarrow 0$ и $\Delta\omega \rightarrow \infty$.

Това показва, че при реостатно регулиране на скоростта на тези двигатели, за малки натоварвания – ще бъде неефективно.

Плавността на регулиране се определя от броя на регулировъчните степени. Методът за изчисляване на регулировъчните съпротивления не се различава от този на пусковите, само че те се изчисляват за продължителен режим на работа.

Пълно използване на двигателя се достига, ако регулирането се осъществява при постоянно товарен момент. Регулирането на скоростта, чрез изменение на съпротивлението в котвената верига, е свързано с големи загуби на мощност, които се отделят в регулировъчните съпротивления. Тези загуби ще бъдат разгледани за двигателя с независимо възбуждане.

При постоянно натоварване, загубата на мощност се определя от уравнението:

$$\Delta P = I_a^2 R_{a\Sigma} = UI_a - EI_a \quad 3.39$$

то може да се запише във вида:

$$\Delta P = c\Phi\omega_0 I_a - c\Phi\omega I_a \quad 3.40$$

и след преобразуване се получава:

$$\Delta P = c\Phi\omega_0 I_a \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad 3.41$$

или

$$\Delta P = P_1 \Delta v$$

където Δv е спад на скоростта в относителни единици;

$$P_1 = c\Phi\omega_0 I_a = UI_a - \text{консумираната от мрежата мощност.}$$

Следователно, при регулиране на скоростта, чрез допълнително съпротивление и постоянно съпротивителен момент, загубите на мощност в

котвената верига са пропорционални на спада на скоростта в относителни единици, т.е. на диапазона на регулиране.

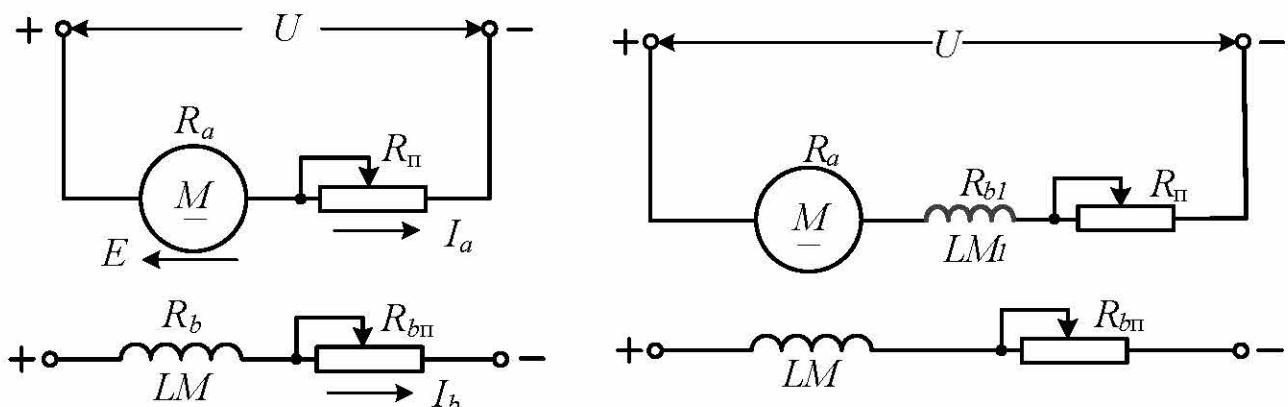
Някои особености, свързани с големината на отделените загуби, възникват, когато съпротивителният момент зависи от скоростта, т.е. $M_c = k\omega^x$. Тогава с повишаване на степенния показател x загубите в котвената верига при реостатно регулиране намаляват.

Реостатното регулиране на скоростта се използва при механизми с вентилационен съпротивителен момент и за регулируеми задвижвания при които продължителността на работа с постоянна скорост не е голяма.

3.6.2. Регулиране на скоростта чрез изменение на магнитният поток

За определени производствени механизми е необходимо да се реализират механични скорости над естествената механична характеристика на двигателя.

Скорости над естествената характеристика, за постояннотокови двигатели с независимо и смесено възбудждане, могат да се получат чрез изменение на възбудждането. Регулирането на скоростта и при двата типа двигатели се извършва с реостат $R_{b\Pi}$, включен последователно на възбудителната намотка, както е показано на фиг.3.17. Чрез него се намалява възбудителният ток, а от там и магнитният поток на двигателя.



Фиг.3.17 Регулиране на скоростта на двигателя, чрез изменение на магнитния поток с реостата $R_{b\Pi}$, последователно включен на възбудителната намотка

От уравнение (3.9) следва, че скоростта на идеален празен ход

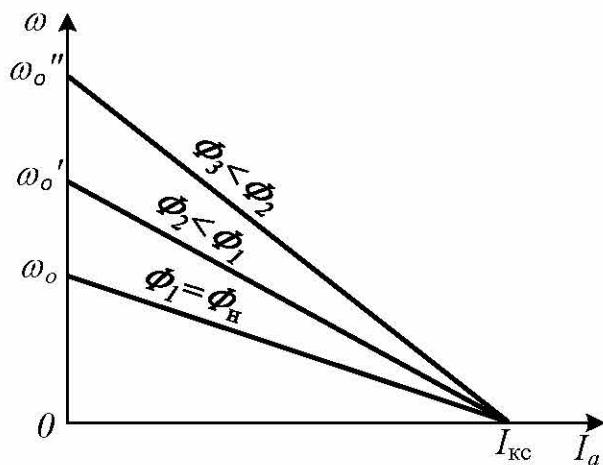
$$\omega_0 = \frac{U}{c\Phi}$$

и статичният пад на скоростта

$$\Delta\omega = \frac{R_{a\Sigma}}{c^2} M$$

се увеличават.

На фиг.3.18 са показани електромеханичните характеристики на двигател с независимо възбудждане при различни стойности на потока Φ .



Фиг.3.18 Електромеханични характеристики на двигател с независимо възбудждане при регулиране на скоростта с магнитния поток

При скорост $\omega = 0$ токът на късо съединение в котвата може да бъде определен от уравнението на електромеханичната характеристика.

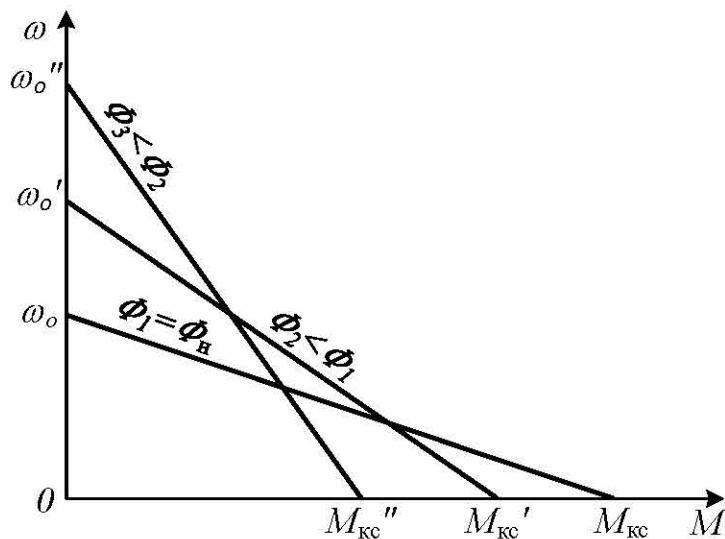
$$0 = \frac{U}{c\Phi} - \frac{R_{a\Sigma}}{c\Phi} I_{kc},$$

от където,

$$I_{kc} = \frac{U}{R_{a\Sigma}} = \frac{U}{R_a + R_\pi}$$

От последното уравнение се вижда, че при скорост $\omega = 0$, токът на късо съединение се определя само от съпротивлението в котвената верига. Поради това всички електрически характеристики за различни стойности на магнитния поток ще преминават през една обща точка на абсцисната ос ($\omega = 0$, $I_a = I_{kc}$).

На фиг.3.19 са дадени съответните механични характеристики за трите стойности на магнитния поток, както при електромеханичните характеристики от фиг.3.18. Скоростите на идеален празен ход ω_0 , ω_0' и ω_0'' са същите както при електромеханичните характеристики.



Фиг.3.19 Механични характеристики на двигател с независимо възбудждане при регулиране на скоростта с магнитния поток

Моментите на късо съединение M_{kc} , M_{kc}' и M_{kc}'' са различни и намаляват с намаляване на потока, т.к. се определят от израза за момента:

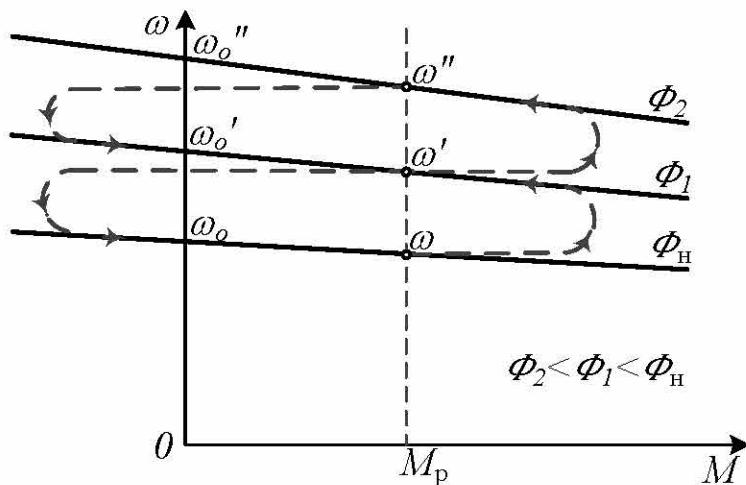
$$M_{\text{kc}x} = c\Phi_x I_{\text{kc}}$$

В следствие на това механичните характеристики нямат обща пресечна точка на абсцисната ос, а се пресичат в различни, разположени в I-ви квадрант.

От фиг.3.19 се вижда, че след пресечната точка на механичната характеристика с абсцисата при по-малък магнитен поток се получава в областта на големите натоварвания, т.к. в тази област преобладава увеличението на пада на скоростта $\Delta\omega$, а не увеличението на номиналната скорост ω_0 .

Обикновено скоростта се регулира за стойности на момента, за които скоростта расте при намаляване на магнитния поток.

Механичните характеристики при различни стойности на магнитния поток в областта на номиналния работен режим на двигателя са показани на фиг.3.20.



Фиг.3.20 Регулиране на скоростта чрез промяна на магнитния поток

При преминаване от една характеристика на друга се приема, че потокът Φ се изменя веднага до новата си стойност. В действителност, като следствие на голямата индуктивност на възбудителната намотка, потокът не се изменя веднага, а за известно време. Това преминаване се осъществява по кривите, показани с пунктир, и е обект на анализ при изследване на динамичните характеристики на задвижването.

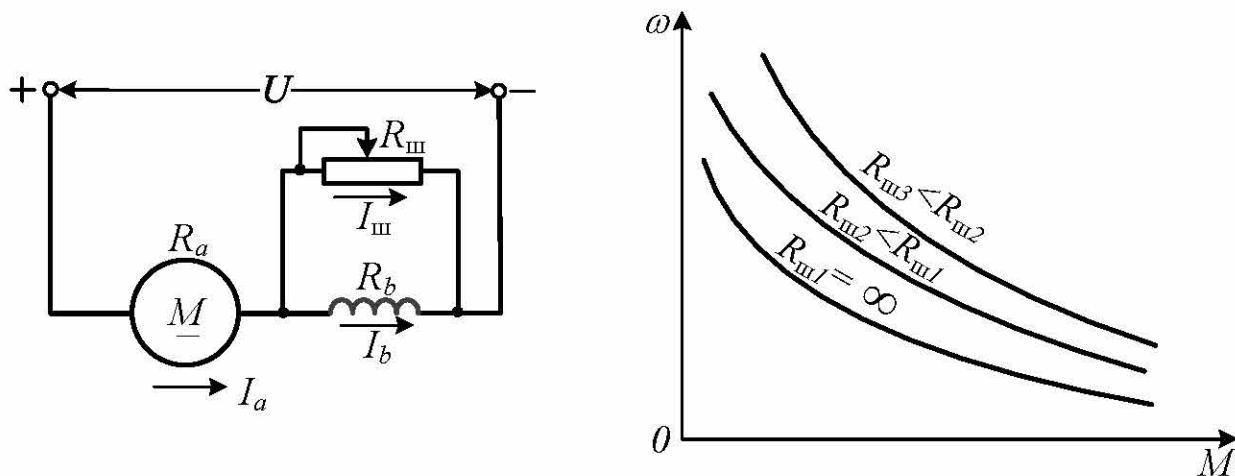
Регулирането на скоростта, чрез изменение на магнитният поток, се характеризира с висока икономичност, плавност и диапазон 8:1. То е намерило широко приложение при двигателите с независимо и смесено възбуждане.

Регулирането на скоростта, чрез изменение на магнитният поток при двигателите с последователно възбуждане е възможно както за намаляване, така и за увеличаване на магнитния поток. Възможно е значително увеличение

на скоростта при малки натоварвания и затова не се препоръчва широкото му приложение.

Промяната на магнитния поток се извършва, чрез шунтиране на възбудителната или котвената намотка на двигателя. Регулирането на скоростта на въртене, чрез шунтиране на възбудителната намотка с шунтиращо съпротивление е показано на схемата на фиг.3.21. От схемата е видно, че се получава намаление на магнитния поток, т.к. при зададен товарен ток I_a възбудителният ток е $I_b = I_a - I_{\text{ш}}$. При промяна стойността на шунтиращото съпротивление се изменя токът $I_{\text{ш}}$, а от там и възбуждането на двигателя. Регулирането на скоростта над основната се осъществява с намаляване на магнитния поток спрямо номиналния.

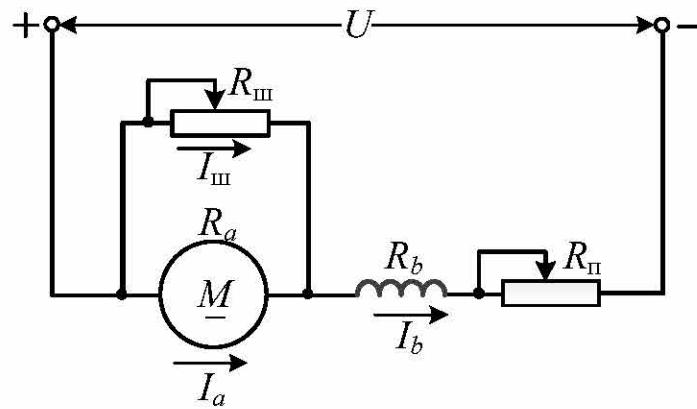
Диапазонът на регулиране по тази схема (фиг.3.21) достига до 2:1. Този начин на регулиране на скоростта е икономичен, защото загубите във възбудителната намотка и в шунтиращото съпротивление $R_{\text{ш}}$ са малки.



Фиг.3.21 Схема на свързване и механични характеристики на двигател с последователно възбуждане за регулиране на скоростта му

Увеличаване на магнитният поток може да се постигне, чрез шунтиране на котвата на двигателя с последователно възбуждане (фиг.3.22). От наличието на шунтиращо съпротивление $R_{\text{ш}}$ токът във възбудителната намотка е по-голям от тока в котвата $I_b = I_a + I_{\text{ш}}$, а от там и магнитния поток.

Регулирането на скоростта се осъществява под естествената механична характеристика. Увеличеният магнитен поток и спадът на напрежение в последователно включеното съпротивление $R_{\text{ш}}$ довеждат до чувствително намаление на скоростта. При схемата с шунтиране на котвата (фиг.3.22), се получава кратна стойност на скоростта на идеален празен ход, която е следствие от наличието на възбудителен ток $I_b = I_{\text{ш}}$, дори когато котвения ток е нулев $I_a = 0$.



Фиг.3.22 Схема на свързване при шунтиране на котвата на двигател с последователно възбуждане

При празен ход $I_a = 0$

$$I_b = I_{\text{ш}} = \frac{U}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}} + R_a} \quad 3.42$$

и

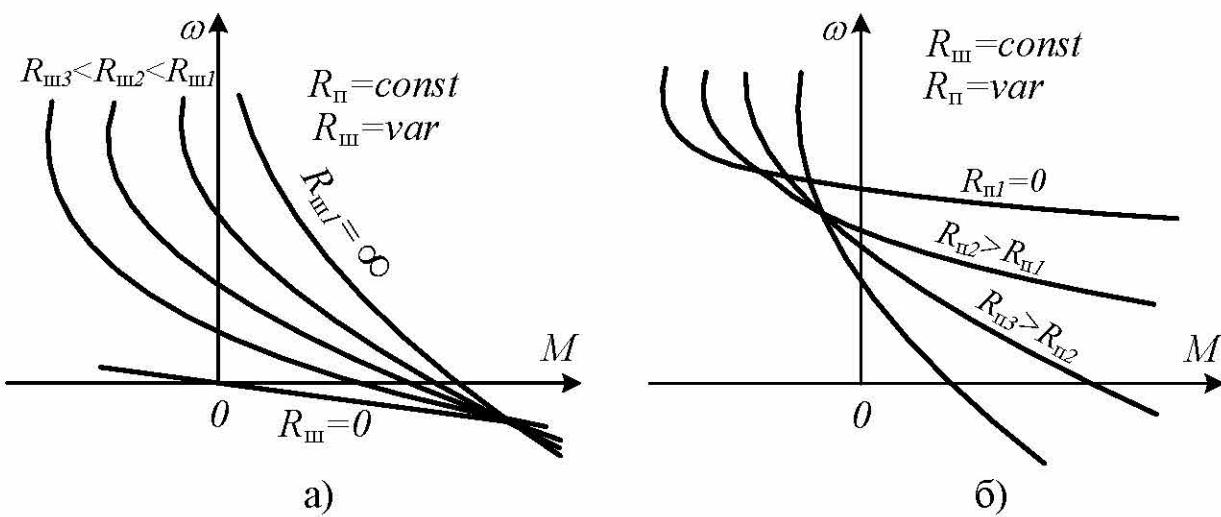
$$E = c\Phi\omega_0 = I_{\text{ш}}R_{\text{ш}} \quad 3.43$$

От последното равенство се определя скоростта на идеален празен ход:

$$\omega_0' = \frac{I_{\text{ш}}R_{\text{ш}}}{c\Phi} = \frac{U}{c\Phi} \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}} + R_b} = \omega_0 \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{п}} + R_b} \quad 3.44$$

Тук $\omega_0' < \omega_0$ и следователно механичните характеристики ще бъдат разположени под естествената характеристика.

На фиг.3.23 са показани механичните характеристики за различни стойности на шунтиращото $R_{\text{ш}}$ и последователно включеното $R_{\text{п}}$ съпротивление. При $R_{\text{п}} = \text{const}$ и $R_{\text{ш}} = \text{var}$ (фиг.3.23а) намаляването на шунтиращото съпротивление измества характеристиката надолу и наляво, като същевременно нараства твърдостта. При $R_{\text{ш}} = 0$ напрежението на изводите е равно на нула и се получава режим на динамично спиране.



Фиг.3.23 Механичните характеристики на двигател с последователно възбуждане за различни стойности на шунтиращото $R_{\text{ш}}$ и последователно включеното $R_{\text{п}}$ съпротивления

При характеристиките $R_{ш} = const$ и $R_{п} = var$ (фиг.3.23б), се вижда че с намаляване на $R_{п}$ характеристиките стават по-малко стръмни.

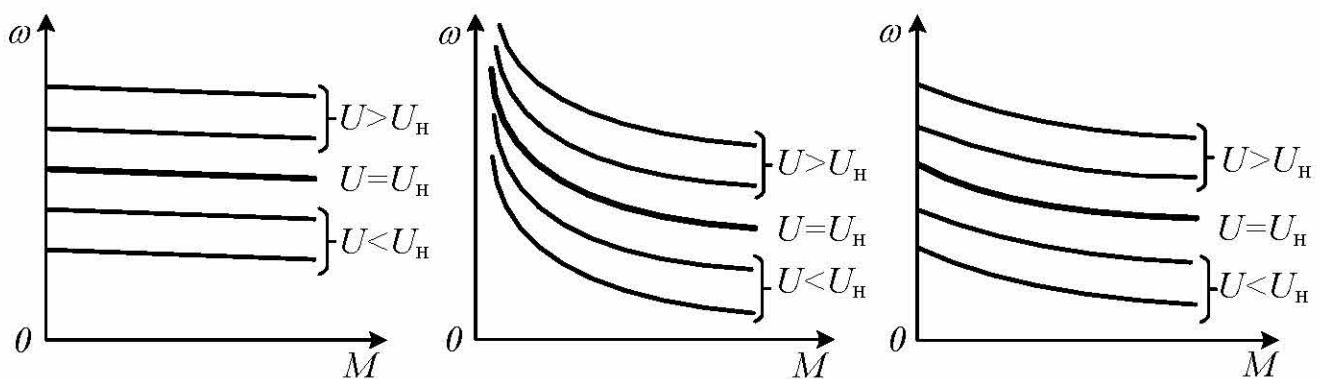
Диапазонът на регулиране по тази схема достига до $(3\div 5):1$. Регулирането на скоростта по схемата с шунтиране на котвата е свързано с големи загуби на енергия в съпротивленията $R_{ш}$ и $R_{п}$ и е приложимо при кратковременна работа.

3.6.3. Регулиране на скоростта, чрез изменение на напрежението приложено към котвената верига на двигателя за постоянен ток

Регулирането на скоростта чрез изменение на напрежението приложено към котвената верига е приложим за двигатели за постоянен ток с независимо, с последователно и смесено възбудждане. Практически този начин се използва главно при двигатели за постоянен ток с независимо възбудждане.

За реализацията на този метод е необходим източник на захранване, напрежението на който може да се мени в широки граници.

Съгласно общото уравнение (3.38) за механичната характеристика на двигателите за постоянноен ток при изменение на захранващото напрежение U се изменя само скоростта на идеален празен ход $\omega_0 = \frac{U}{c\Phi}$, а статичният пад на скоростта $\Delta\omega = \frac{R_{a\Sigma}}{c^2} M$ не се изменя. Следователно, механичните характеристики получени, чрез изменение на напрежението ще са успоредни на естествената механична характеристика. На фиг.3.24 са показани характеристиките на двигателите с независимо, последователно и смесено възбудждане.



Фиг.3.24 Механични характеристики на постояннотокови двигатели, при изменение на захранващото напрежение

Регулирането на скоростта чрез изменение на напрежението е възможно както под, така и над основната скорост, но практически се използва за понижаване на скоростта, което се постига с напрежение $U < U_h$.

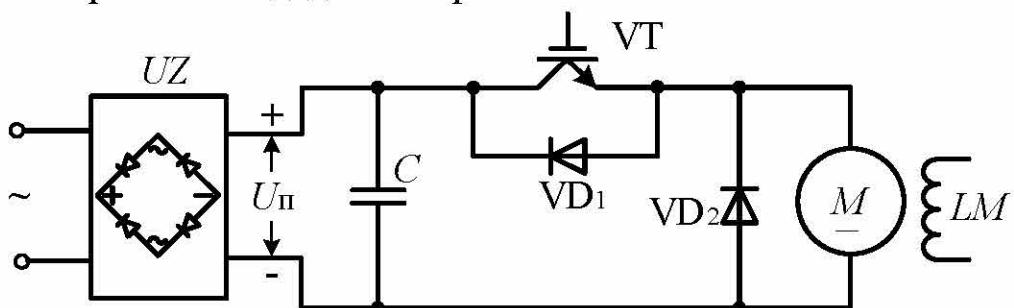
Твърдостта на механичните характеристики се запазва, следствие на което и стабилността на работа е висока.

Диапазонът на регулиране достига до 10:1. Загубите на енергия са незначителни $\Delta P < (2 \div 3)P_h$.

При регулиране скоростта на двигатели с независимо и смесено възбуждане чрез изменение на напрежението се постига намаление на скоростта на идеален празен ход почти до нула. Това не позволява реализацията на режим на генераторно спиране с отдаване на енергия в мрежата при ниски стойности на скоростта.

3.6.4. Импулсно регулиране на скоростта на двигателите за постоянен ток

Най-ефективният начин за регулиране скоростта на постояннотоковия двигател е свързан с изменение на приложеното напрежение на котвената намотка. Напрежението се изменя по импулсен метод за регулиране, като двигателя периодично се включва и изключва към източника на захранване. В периода, когато двигателя е включен към мрежата, енергията от източника се приема от двигателя, като основната част от тази енергия чрез двигателя се подава на производствения механизъм, а част от нея се трансформира в кинетична и електромагнитна. При изключване от мрежата, електродвигателя работи от запасената кинетична и електромагнитна енергия. При това периодичните включвания се извършват по такъв начин и с такава честота, че желаната скорост се получава като средна скорост в границите на периода на изменение. Примерната схема на работа на двигателя за постоянноен ток с независимо възбуждане и транзисторен широчинно-импулсен регулатор (ШИМ) на напрежение е дадена на фиг.3.25.



Фиг.3.25 Широчинно-импулсен регулатор на скоростта за постояннотоков двигател с независимо възбуждане

В схемата котвената намотка на двигателя периодично се включва от транзисторния ключ VT към източника на постоянно напрежение U_{Π} , което като правило се получава от мрежата чрез изправител UZ. Електролитният кондензатор C е с голям капацитет служи за изглаждане на пулсациите в изправеното напрежение U_{Π} .

Включването и изключването на захранващото напрежението се осъществява от ключовия транзистор VT. Честотата на комутация f_k на веригата е постоянна.

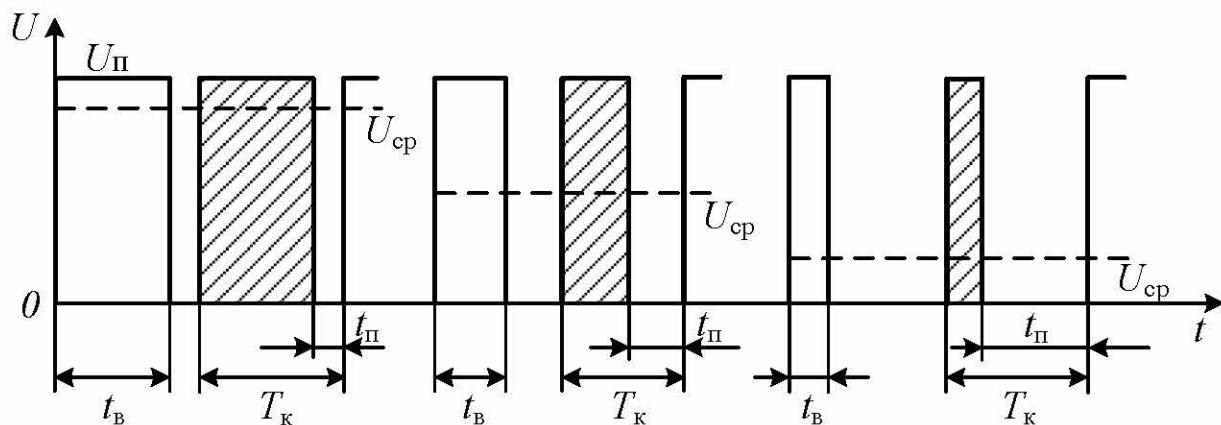
$$f_k = \frac{1}{T_k} ,$$

където T_k е време на комутация.

Средното напрежение U_{cp} (фиг.3.26), подавано на котвата на двигателя, се определя от отношението на времето на включеното състояние на ключа t_B , към времето на периода на комутация $T_k = t_B + t_\pi$. Ако времето на включено състояние $t_B = 0.95T_k$, то средното напрежение постъпващо, към двигателя, е намалено и е $U_{max} = 0.95U_\pi$. С намаляване времето на включено състояние на транзистора VT, средната стойност на напрежението също намалява. От фиг.3.26 следва, че средното напрежение на широчинно-импулсен регулатор е:

$$U_{cp} = U_\pi \frac{t_B}{T_k} = \gamma U_\pi , \quad 3.45$$

където γ е относителната продължителност на включване на транзистора.



Фиг.3.26 Принцип на широчинно-импулсен регулатор на напрежение

За нереверсивна схема на свързване относителната продължителност на включване се мени в границите $0 < \gamma < 0.95$.

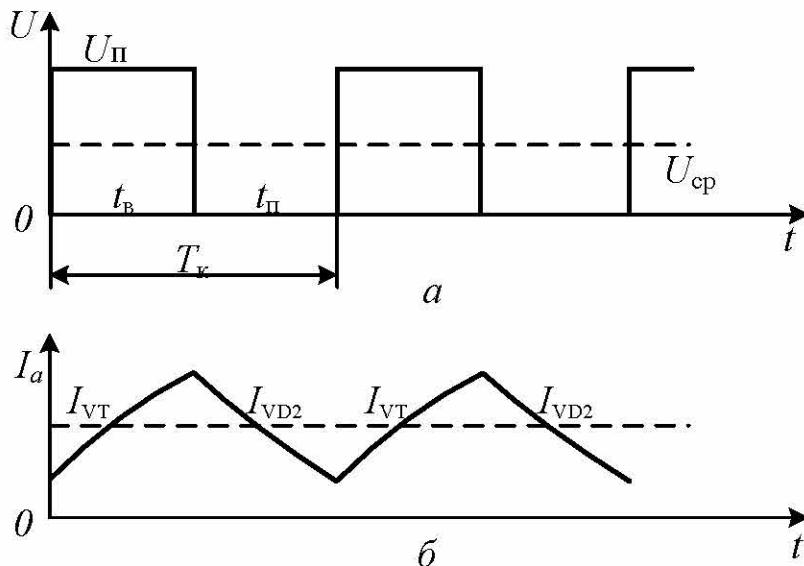
При запущен транзисторен ключ VT, тока в котвената верига на двигателя, не може да се прекъсне веднага, т.к. веригата на котвата притежава значителна индуктивност. Затова след прекъсване на захранването към котвата от транзистора VT, под действие на ЕДН на самоиндукция на намотката, ще протече ток през шунтиращия диод VD2. Диаграмата на напрежението и тока по време на този процес е показана на фиг.3.27.

Пулсациите на тока зависят от честотата на комутация f_k . При по-голяма честота се получават по-малки амплитудни пулсации. Затова при широчинно-импулсното регулиране, честотата е над 2kHz.

Средното напрежение на входа на двигателя ще бъде $U_d = \gamma U_\pi$ и електромеханичната и механичната характеристики на двигателя се представят с уравненията:

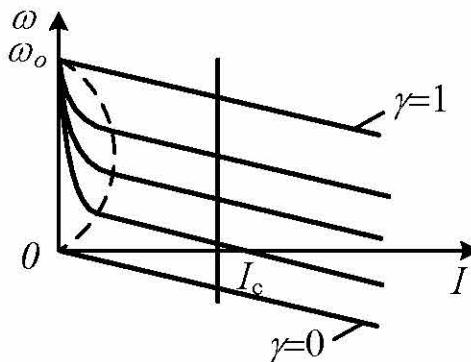
$$\omega = \frac{\gamma U_\pi}{c\Phi} - \frac{IR_a}{c\Phi} \quad 3.46$$

$$\omega = \frac{\gamma U_\pi}{c\Phi} - \frac{R_a M}{(c\Phi)^2} \quad 3.47$$



Фиг.3.27 Времедиаграми на напрежението и тока

Електромеханичните характеристики на нереверсивен режим на двигателя за постоянен ток с независимо възбуждане и ШИМ са дадени на фиг.3.28.



Фиг.3.28 Електромеханичните характеристики на двигателя за постоянноен ток с независимо възбуждане и ШИМ

При малки натоварвания се явява режим на прекъснат ток. Зоната на прекъснатия ток е означена с пунктирани линии. Намаляването ѝ се постига с увеличаване на честотата на комутации f_k , до която използваните транзисторни и тиристорни елементи позволяват.

От фиг.3.28 се вижда, че всички електромеханични характеристики имат еднаква скорост ω_0 и сравнително голяма твърдост.

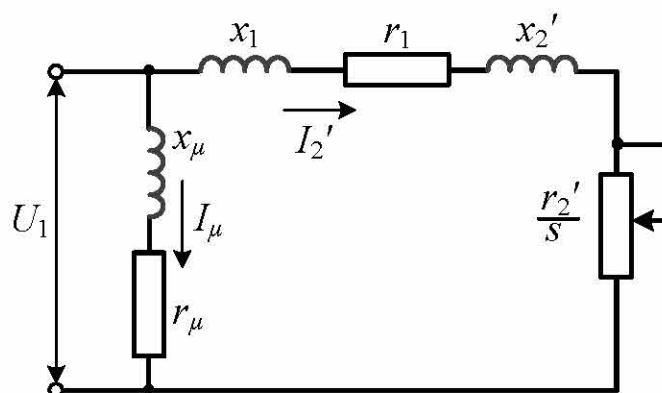
Глава 4

УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИГАТЕЛИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК

4.1. Механични характеристики на трифазните асинхронни електродвигатели

Асинхронните двигатели намират широко приложение в промишлеността поради възможността за захранване от трифазната мрежа за променлив ток, надеждността им при експлоатация, простото им устройство и ниска цена. Асинхронните двигатели са с *накъсо съединен ротор* и с *навит ротор*.

Анализът на механичните свойства на асинхронните двигатели се извършва на базата на заместващи или еквивалентни схеми. Асинхронната машина се разглежда като трансформатор не само при неподвижен ротор, но и при въртенето му. Най-използвана е Г-образната заместваща схема с намагнитваща верига, пресичана на изводите на първичната верига. Тази схема е дадена на фиг. 4.1, където са приети следните означения:



Фиг. 4.1 Г-образна заместваща схема

U_1 – първично фазово напрежение;

I_2' - приведен ток в ротора;

I_μ – намагнитващ ток;

r_1 и r_2' - първично и приведено вторично активно съпротивление;

x_1 и x_2' - първично и приведено вторично индуктивно съпротивление;

$x_k = x_1 + x_2'$ - пълно индуктивно съпротивление за фаза на двигателя в режим на късо съединение;

r_μ и x_μ – активно и индуктивно съпротивление на намагнитващата верига;

$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – хъзгане на двигателя;

$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_1}$ – синхронна ъглова скорост на двигателя;

f_1 – честота на захранващата мрежа;

p_1 – брой на чифтовете полюси на статора;

m_1 – брой на fazите на двигателя.

Като първична верига се означава статорната верига на двигателя, а като вторична – роторната. От еквивалентната схема на фиг.4.1, приведеният ток в ротора на двигателя се определя от израза:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad 4.1$$

Основната част на консумираната от мрежата мощност се преобразува в електромагнитна мощност, а другата част се изразходва, като топлинни загуби в намагнитващата верига и в медта на статора, т.е.

$$P_1 = P_{\text{ем}} + P_{m1} + P_\mu = m_1 \left[\frac{(I_2')^2 r_2'}{s} + (I_2')^2 r_1 + I_\mu^2 r_\mu \right] \quad 4.2$$

Електромагнитната мощност $P_{\text{ем}}$ предавана от статора на ротора е:

$$P_{\text{ем}} = \frac{m_1 (I_2')^2 r_2'}{s} = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2\right] s} \quad 4.3$$

Тази мощност определя електромеханичния момент

$$M = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_0} = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{\omega_0 s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2\right]} \quad 4.4$$

След привеждане под общ знаменател на уравнение (4.4) за електромагнитният момент се получава израза:

$$M = \frac{m_1}{\omega_0} \cdot \frac{U_1^2 r_2' s}{(r_1 s + r_2')^2 + x_k^2} \quad 4.5$$

От израза (4.5) се вижда, че електромагнитният момент е сложна функция от хъзгането. Тя може да се изследва, за да се определи максималният

електромагнитен момент. Ако се намери производната dM/ds и се приравни на нула, може да се определи стойността на *критичното хълзгане* - s_k , при което двигателят развива максимален момент

$$s_k = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} \quad 4.6$$

Положителният знак на критичното хълзгане се отнася за двигателен режим на машината, а отрицателният - за генераторен режим.

Максималният момент, развиван от двигателителя се нарича *критичен момент*. Като се замести s_k от уравнение (4.6) в израза за момента (4.5), за критичният момент се получава следната зависимост:

$$M_k = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_0 \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \pm r_1} \quad 4.7$$

От уравнение (4.7) се вижда, че максималният момент в двигателен и генераторен режим се получава при еднаква абсолютна стойност на критичното хълзгане. Обаче критичният момент в генераторен режим $M_{k\Gamma}$ е по-голям от критичният момент в двигателен режим M_{kD} , което се вижда от отношението на критичните моменти $M = f(s)$ само в каталожните данни за двигателите.

$$\frac{M_{k\Gamma}}{M_{kD}} = \frac{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_1} \quad 4.8$$

Уравнението (4.5) за механичната характеристика на двигателеля не е удобно за определяне вида на зависимостта на механичната характеристика. За това се ползва отношението на електромагнитния момент от уравнение (4.5) към критичния момент за двигателен режим на механичната характеристика по каталожни данни.

$$M = \frac{2M_k(1 + \varepsilon)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\varepsilon} \quad 4.9$$

където

$$\varepsilon = \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{r_1}{r_2'} s_k \quad 4.10$$

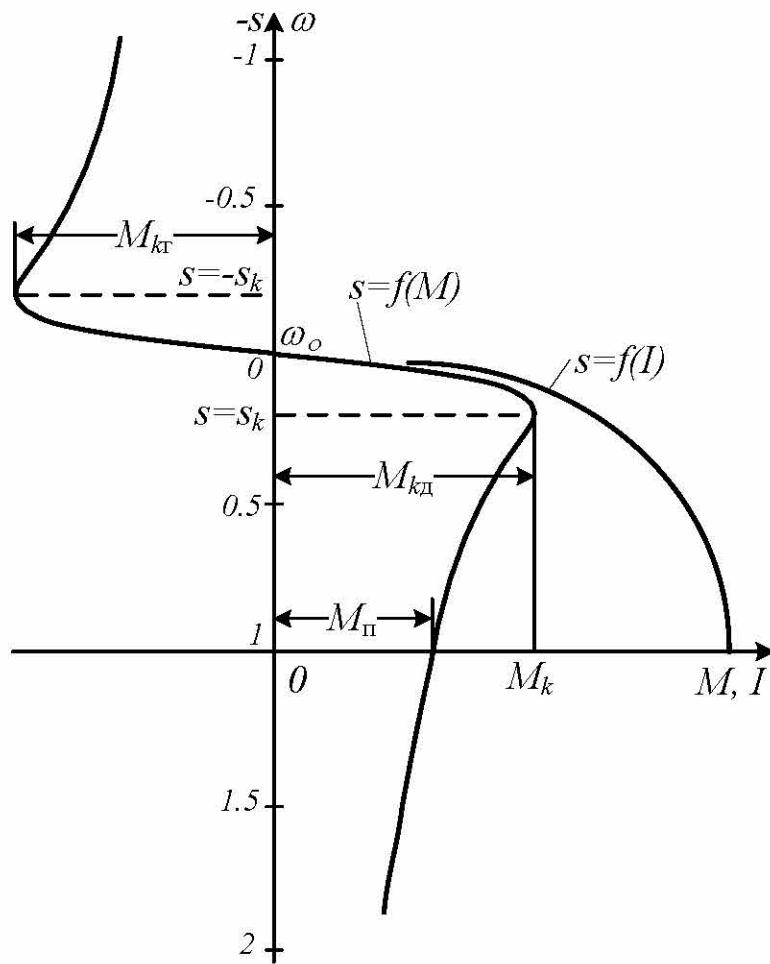
Уравнение (4.9) се нарича *уточнено* уравнение на механичната характеристика на асинхронен двигател. При асинхронните двигатели активното съпротивление r_1 е много по-малко от реактивното - x_k ($r_1 \approx 10 \div 12\% x_k$) и за това може да се пренебрегне. Тогава при $\varepsilon = 0$ от уравнение (4.9) ще се получи *опростеното* уравнение на механичната характеристика (формула на Клос):

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad 4.11$$

Видът на механичната характеристика на асинхронен двигател за двигателен и генераторен режим е дадена на фиг.4.2. Тя има следните характерни точки:

- a) $s = 0, M = 0$ – точка съответстваща на синхронната скорост на двигателя;
- б) $s = s_H, M = M_H$ – номинален режим на работа;
- в) $s = s_k, M = M_{kD}$ – точка съответстваща на критичния режим;
- г) последната точка съответства на началния пусков момент, когато $s = 1$,

$$\text{а } M = M_\pi, M_\pi = \frac{2M_k(1+\varepsilon)}{\frac{1}{s_k} + s_k + 2\varepsilon}$$



Фиг.4.2 Механичната характеристика на асинхронен двигател

От механичната характеристика на фиг.4.2 се вижда, че асинхронният двигател работи нормално при хълзгания от $s = 0$ до $s = (1.2 \div 1.5)s_H$. При това отношението s/s_k е много по-малко (≈ 10 пъти), от отношението s_k/s , и то може да се пренебрегне. Тогава за механичната характеристика от уравнение (4.11) се получава уравнение на права линия:

$$M = \frac{2M_k}{s_k} s = A_1 s \quad 4.12$$

Следователно, за работният участък на естествената механична характеристика на асинхронните двигатели, зависимостта на момента от хълзгането ще бъде почти линейна.

За втората част от механичната характеристика на фиг.4.2, когато $s > s_k$ може да се пренебрегне отношението s_k/s и за момента ще се получи уравнението:

$$M = \frac{2M_k}{s} s_k = \frac{A_2}{s} \quad 4.13$$

От тук следва, че втората част от механичната характеристика на асинхронния двигател има формата на хипербола. Тя се използва обикновено само при пускови и спирачни режими.

За асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор са характерни и величините: *кратност на пусковия момент* $\lambda = M_{\text{п}}/M_{\text{н}}$ (за нормалните серии двигатели е в границите 1÷2) и *кратност на пусковия ток* $\lambda_I = I_{\text{п}}/I_{\text{н}}$ (в границите 5÷7).

Това показва, че двигателят с накъсо съединен ротор консумира от мрежата твърде голям пусков ток, но развива сравнително малък пусков момент. Това привидно противоречие се обяснява с факта, че моментът се обуславя само от активната компонента на тока, а не от пълният ток, т.е. $M = c\Phi I_2 \cos \varphi_2$. Тъй като при хълзгане $s = 1$ факторът на мощността $\cos \varphi_2$ е много малък, това определя и по-малкия активен ток $I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2$. При хълзгания $s = s_k$ заедно с нарастването на общия ток, расте и неговата активна компонента, а от там и моментът на двигателя.

При двигатели с навит ротор пускането се осъществява чрез включване на допълнителния активни съпротивления в роторната верига. Това отстранява несъответствието между пусковия момент и пусковия ток, характерно и за двигателите с накъсо съединен ротор.

От уравнение (4.5) за механичната характеристика на двигателя се вижда, че моментът на двигателя е пропорционален на квадрата от захранващото напрежение. При понижаване на напрежението в мрежата с 10÷15%, следва намаление на M_k и съответно намаление на *претоварващата способност* $\lambda_{\text{н}} = \frac{M_{\text{н}}}{M_k}$ до 19÷28%.

Високата чувствителност на асинхронните двигатели към изменението на захранващото напрежение е голям недостатък на тези двигатели.

Реверсирането на асинхронни двигатели най-често се осъществява, чрез превключване (размяна) на две от фазите на статорната намотка.

4.2. Пускане и спиране на трифазни асинхронни двигатели

При пускане на асинхронните двигатели от значение са стойностите на пусковия ток и пусковия момент. За да може роторът на двигателя да се завърти, развиеният от двигателя пусков момент трябва да е по-голям от съпротивителния момент на задвижвания механизъм.

От друга страна, пускането на асинхронните двигатели чрез непосредствено включване към мрежата е свързано с големи пускови токове. Те могат да предизвикат недопустимо големи спадове на напрежението в захранващата мрежа и да наручат нормалната работа на другите консуматори, захранвани от същата мрежа. Ориентировъчно се приема, че за безопасно непосредствено включване на двигателя към мрежата трябва да бъде спазено следното условие:

$$\frac{P_{\text{тр}}}{P_{\text{дв}}} > (3 \div 4) \quad 4.14$$

където $P_{\text{тр}}$ е мощността на трансформаторната станция в kV.A;

$P_{\text{дв}}$ – номиналната приведена мощност на двигателя в kV.A;

При невъзможност да се изпълни това условие се използва пускане с понижено напрежение. Използва се пускане чрез превключване на двигателя от *съединение звезда – Y*, на статорната намотка, в *съединение триъгълник – Δ*, включване във веригата на статора на активно или индуктивно съпротивление или автотрансформатор.

Пускането чрез превключване на двигателя *от звезда в триъгълник* е приложимо за двигатели, нормално работещи при триъгълно съединение на статорната намотка. Включването в първия момент на статора в съединение звезда намалява напрежението на всяка фаза $\sqrt{3}$ пъти, а пусковият ток консумиран от мрежата при съединение звезда е 3 пъти по-малък, отколкото в съединение триъгълник. Пусковият момент M_{H} намалява също 3 пъти, т.к. той е пропорционален на квадрата на напрежението ($M_{\text{H}} \sim U^2$). Затова пускането на асинхронния двигател по схемата звезда-триъгълник е възможно при празен ход или при малко натоварване.

Включването на *индуктивни или активни съпротивления* в статорната верига се използва за пускане на двигатели с голяма мощност. Двигателят първо се развърта при включено последователно активно или индуктивно съпротивление в статора. Съпротивленията ограничават подаваното към двигателя напрежение, а с това се намалява пусковият ток и пусковият момент. След развъртането на двигателя съпротивленията се шунтират и двигателят преминава на работа върху естествената си характеристика.

Едностъпално *автотрансформаторно* пускане се прилага при двигатели с ниско напрежение. В началото към статора на двигателя се подава понижено напрежение чрез автотрансформатора. При достигане на максималната скорост (за даденото напрежение) автотрансформатора се шунтира и двигателът получава номиналното напрежение, преминавайки на естествената си характеристика.

При автотрансформаторното пускане токът в статорната намотка е пропорционален на пониженото напрежение от изхода на автотрансформатора.

Асинхронните двигатели с навит ротор се пускат с помощта на активни пускови резистори, включени в роторната верига на двигателя. С ускоряването на двигателя те постепенно се изключват. Имат приспособление за затваряне накъсо на роторните пръстени, към които чрез контактните четки е бил включен пусковият резистор и последващо повдигане на четките. С включването на активното съпротивление в роторната верига се намалява пусковия ток, но се увеличава пусковия момент M_{π} . Това е резултат от увеличената активна съставяща на тока, определяща нарастването на пусковия момент.

При изчисляването на пусковите съпротивления се използва графичен метод. Изборът на максималния момент $M_{\pi 1}$ и момента на превключването $M_{\pi 2}$, както и при двигателите за постоянен ток, се определят от условията на натоварване при пускане, от необходимото време за пускане и от допустимия максимален токов удар. Максималният пусков момент ориентировъчно се избира в границите $M_{\pi 1} = (0.8 \div 0.9)M_k$, а моментът на превключване $M_{\pi 2} = (1.2 \div 1.5)M_c$.

Асинхронните двигатели могат да работят както в двигателен, така и във всички варианти на спирачни режими – *генераторно спиране с отдаване на енергия в мрежата, спиране с противовключване и динамично спиране*.

Рекуперативно (генераторно) спиране се осъществява само при скорости на ротора по-високи от синхронната. При скорост $\omega > \omega_0$ ($s < 0$) двигателът работи, като генератор - електромагнитната мощност сменя знака си и електрическата енергия се отдава в мрежата.

Необходимата за създаване на магнитното поле реактивна енергия на асинхронната машина се получава винаги от мрежата.

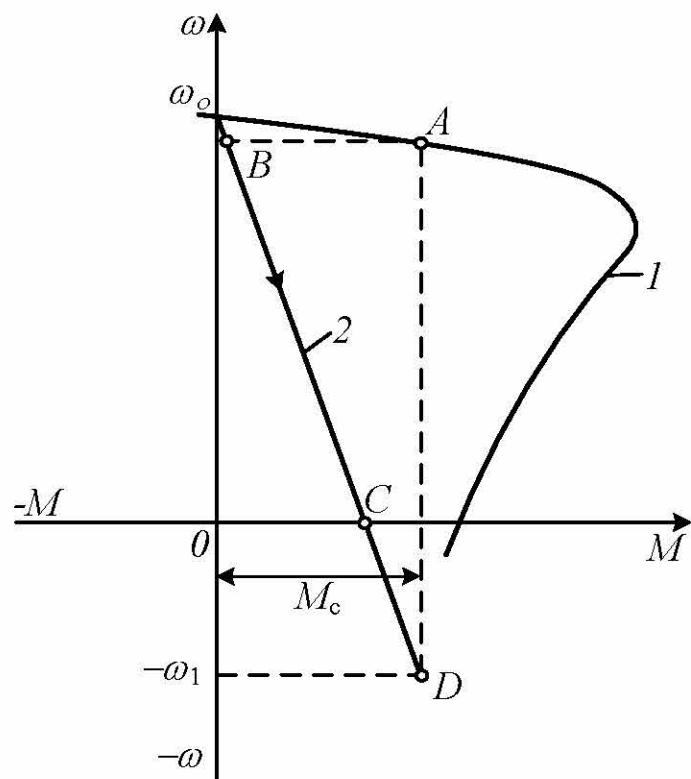
Режимът на генераторното спиране с отдаване на енергия в мрежата се използва при спускане на тежки товари, подемно-транспортни машини, многоскоростните асинхронни двигатели с превключване на броя на намотките и др..

Спирането с противовключване при асинхронните двигатели е възможно както при активен, така и при реактивен статичен момент. При активен

статичен момент спирачния режим се използва при спускане на товари в подемно-транспортни механизми, задвижвани от асинхронни двигатели. В този случай роторът на двигателите се върти от механизма в посока обратна на въртящото се магнитно поле на статора.

За асинхронният двигател с навит ротор, работещ в режим на подем т.А (фиг.4.3) по характеристика 1, при включване на достатъчно голямо съпротивление във веригата на ротора, новият установен режим ще настъпи в т.Д от характеристиката 2, където $M = M_c$ и $\omega < 0$ по реостатните характеристики.

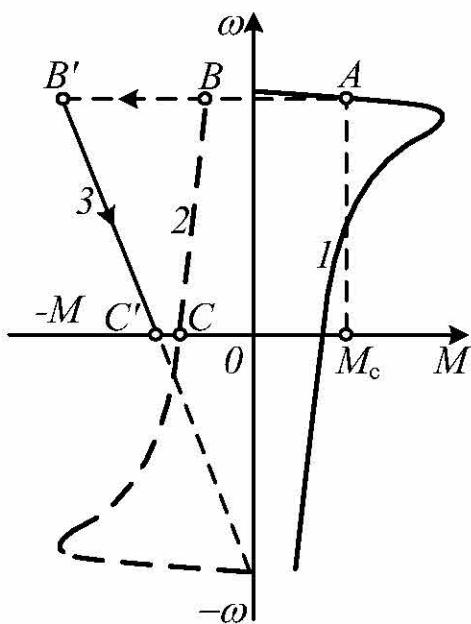
Въртящото се магнитно поле (създавано от статора) е запазило посоката си на въртене, но роторът под действие на товара се завъртял в обратна посока, ще имаме спускане с противовключване със скорост ω_1 . Скоростта на спускане се регулира чрез изменение на големината на съпротивлението в ротора.



Фиг.4.3 Спирале с противовключване на асинхронен двигател с навит ротор

Бързо спирале с противовключване при реактивен статичен момент се постига чрез размяна (превключване) на две от фазите на статорната намотка.

Асинхронният двигател с накъсо съединен ротор, работещ в т.А на характеристика 1 (с тази посока на въртене), при превключване на фазите ще премине в т.В на механичната характеристика 2, отразяваща обратна посока на въртене на магнитното поле, фиг.4.4.



Фиг. 4.4 Спираче с противовключване на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор

Двигателят ще работи в спирачен режим на противовключване от т.В до т.С на характеристиката. Достигайки т.С трябва да изключим двигателя от мрежата.

Спираче с противовключване може да се осъществи по реостатна характеристика 3 на отсечката от т.В' до т.С' (фиг.4.4)

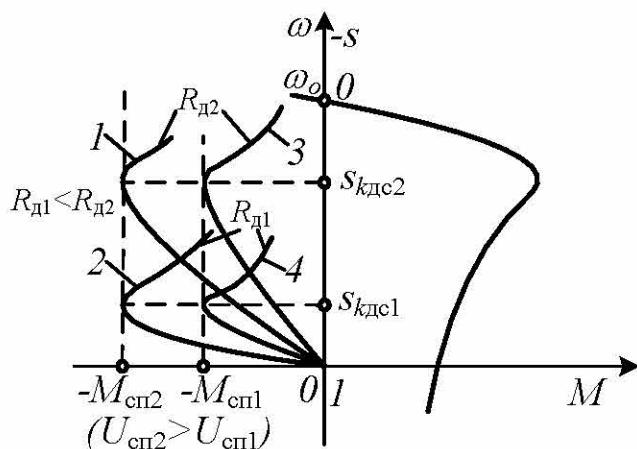
Ограничаване на тока и увеличаване на момента в роторната верига при двигателите с навит ротор се реализира чрез включване на допълнително активно съпротивление.

Спираче с противовключване при двигателите с навит ротор намира широко приложение при задвижването на подемно-транспортни механизми независимо от значителните загуби в реостатните съпротивления. При асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор, то се ограничава за двигатели с малка мощност, поради големите токове при спираче.

Динамичното спираче при асинхронните двигатели се получава, когато статорната намотка на двигателя се изключи от променливо токовата мрежа и две от фазовите намотки се захранят от източник на постоянен ток. Протичащи в статорната намотка ток създава неподвижен в пространството магнитен поток. Силовите линии на неподвижното поле ще се пресичат от роторните проводници и в тях ще се индуцира ЕДН с честота намаляваща при спирачнето. Роторът се върти под действието на запасената кинетична енергия. Следствие на индуцираното ЕДН в роторната намотка протича ток, който взаимодейства с неподвижното магнитно поле и в резултат на това се създава спирачен момент - $M_{сп}$. Големината му зависи от намагнитващия ток на статора, скоростта на двигателя и съпротивлението на роторната намотка.

При асинхронните двигатели с навит ротор, постоянният ток може да се подаде или в статора, или в ротора. Обикновено постоянния ток се подава в статора независимо от конструкцията.

При захранване на статорната намотка с постоянен ток има значение само активното съпротивление на роторната намотка. Незначителната (малката) стойност на това съпротивление обуславя необходимостта от ниско напрежение за възбудждане. Механичните характеристики в режим на динамично спиране $M = f(s_{dc})$ са аналогични по вид с механичните характеристики за двигателен режим (фиг.4.5). Всички характеристики преминават през началото на координатната система, т.к. при скорост равна на нула и спирачният момент е нула. При двигателите с навит ротор и включени допълнителни активни съпротивления R_d в ротора могат да се получат различни механични характеристики в режим на динамично спиране.



Фиг.4.5. Динамично спиране на асинхронен електродвигател

Характеристики 1 и 2 съответстват на две различни по стойности на съпротивленията в роторната верига. Те определят критичното хълзгане s_{kdc} при еднаква стойност на постоянния ток в статора. Характеристиките 3 и 4 съответстват на същите съпротивления, но за по-малък постоянен спирачен ток $U_{cpl2} > U_{cpl1}$ в ротора.

Динамичното спиране при задвижвания с асинхронни двигатели с накъсо съединен ротор може да се осъществи чрез спиране със самовъзбудждане, като статорната намотка се включи към кондензаторна батерия. Тогава машината работи, като асинхронен генератор със самовъзбудждане. При въртенето на ротора от остатъчния магнетизъм се индуцира малко ЕДН в статорната намотка. Приложено към кондензаторната батерия е причина за протичане на капацитивен ток в статорната намотка, който създава въртящо се магнитно поле. Увеличават се напрежението на изводите на статора, ЕДН и токът през кондензаторната батерия и т.н.. Самовъзбудждането на асинхронният генератор е аналогично с това при машините за постоянен ток. Динамичното спиране със

самовъзбуждане не е намерило широко приложение заради високата стойност на кондензаторната батерия и невъзможността да се получи спирачен момент при ниски скорости.

4.3. Електромеханични свойства на трифазните синхронни двигатели. Пускане и спиране на синхронните електродвигатели

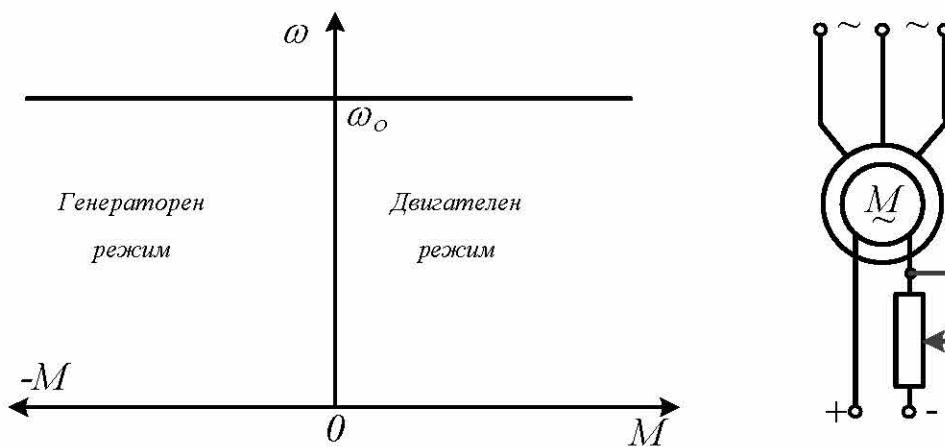
Синхронните двигатели се използват главно за задвижване на механизми, които не изискват регулиране на скоростта. Скоростта на въртене на синхронния двигател не зависи от натоварването до определена максимална стойност M_{max} , а се определя от честотата на захранващата мрежа и броя на цифтовете полюси на магнитната система на двигателя, т.е. ъгловата скорост е:

$$\omega = \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad 4.15$$

За оборотите на въртене на вала на двигателя може да се запише:

$$n = n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad 4.15$$

Следователно, механичната характеристика $\omega = f(M)$ е права линия, успоредна на абсцисната ос. Принципната схема на включване на синхронния двигател и механичната му характеристика са показани на фиг.4.6.



Фиг.4.6 Механичната характеристика на синхронен двигател

Синхронните двигатели могат да бъдат с явни или неявни полюси. Явно полюсните се изработват за скорости до 100rad/s , а неявно полюсните - за скорост над 100rad/s .

Изпълнението на статорната намотка на трифазния синхронен двигател не се различава от тази на трифазния асинхронен двигател, създаваща въртящо се магнитно поле при включен двигател в захранващата мрежа.

Роторът на синхронния двигател има две намотки:

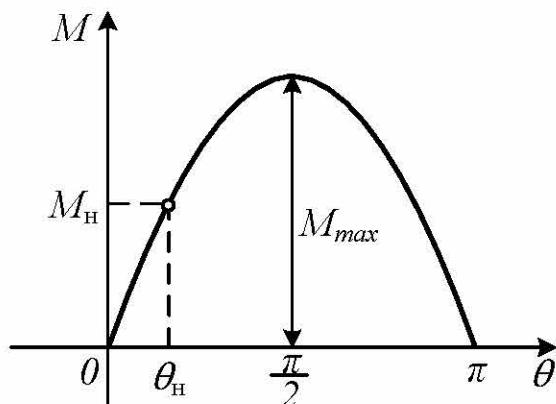
- пускова накъсо съединена намотка, изпълнена както на асинхронния двигател;
- възбудителна намотка, която се захранва от постояннотоков източник, свързан към вала на двигателя.

Първата намотка служи за асинхронно пускане на двигателя, а втората за възбудждането му в нормален работен режим.

Протичащият постоянен възбудителен ток в роторната намотка обуславя синхронното въртене на ротора на двигателя с въртящо се магнитно поле със скорост ω_0 .

За изследване работата на синхронния двигател се използва така наречената ъглова характеристика на двигателя $M = f(\theta)$. Тя е зависимостта на електромагнитният момент M от ъгъла θ между векторите на напрежението на статора U_I и вектора на ЕДН E_I индукирано в статорната намотка. Ъгълът θ се измерва в електрически градуси.

На фиг.4.7 е показана ъгловата механична характеристика за неявнополюсен синхронен двигател.



Фиг.4.7 Механичната характеристика на неявнополюсен синхронен двигател

Синхронният момент на двигателя зависи от ъгъла θ . Отначало с нарастване на θ (нарастване на натоварването) се увеличава синхронният момент до достигане на максимална стойност M_{max} при $\theta = \pi/2$. При по-голямо увеличение на ъгъла θ от $\pi/2$, следва намаляване на синхронния момент - двигателят излиза от *синхронизъм*. Следователно двигателят работи устойчиво само при натоварвания M_c , за които $\theta < \pi/2$.

Номиналният момент на двигателя се избира за ъгъл $\theta = 20 \div 30^\circ$, за да се осигури устойчива работа при възникване на изменения в натоварването. Претоварващата способност на двигателя е $\lambda = 2 \div 3$.

Максималният момент M_{max} на синхронният двигател е пропорционален на първа степен на напрежението в мрежата. От тук и малката му чувствителност при изменението на напрежението в мрежата в сравнение с

асинхронния двигател, чиито момент е пропорционален на квадрата от напрежението в мрежата. Освен това при необходимост от кратковременни натоварвания максималният момент на двигателя може да бъде увеличен чрез нарастване на възбудждането.

Пускането на синхронните двигатели се осъществява с пускова накъсо съединена намотка на двигателя, както при асинхронните двигатели. Тази намотка служи за създаване на пусков момент и за успокояване на колебанията на ротора, които могат да възникнат при пусковия преходен процес.

При синхронното пускане статорната намотка на синхронния двигател се включва директно към захранващата мрежа или посредством токоограничаващи устройства (реактор, автотрансформатор и др.). Възбудителната намотка трябва да е включена към разрядно съпротивление, за да се избегне голямото ЕДН, получено в резултат от въртящото се магнитно поле и големия брой навивки на тази намотка. При достигне стойност $95\div98\%$ от синхронната скорост на двигателя (под синхронната), на възбудителната намотка се подава постоянен ток и двигателят влиза в синхронизъм.

При нормална схема на включване синхронният двигател може да работи както в двигателен, така и в режим на *генераторно спиране с отдаване на енергия в мрежата*. За тази цел е необходимо на валът на машината да се приложи външен въртящ момент и ъгълът θ да стане отрицателен. Тогава механичната характеристика преминава във II^{ри} квадрант, фиг.4.6, с постоянна синхронна скорост ω_0 . Този спирачен режим няма практическо приложение.

Спиране с противовключване при синхронните двигатели се осъществява като се превключват 2 от фазите на статорната намотка, а роторната възбудителна намотка се включи към разрядно съпротивление. Тогава двигателят преминава в асинхронен режим на работа. Този вид спиране се използва рядко, защото в захранващата мрежа се получават големи токови удари, надвишаващи пусковия пик на двигателя и пусковата намотка бързо се загрява. Спирачният момент вследствие на ниския $\cos \varphi$ също е малък.

Динамичното спиране на синхронния двигател е най-разпространения спирачен режим. При него статорната намотка на нормално възбудената машина (двигател) се изключва от мрежата и се затваря през спирачно съпротивление, а на ротора на двигателя се подава постоянен ток. Процесът и механичните характеристики в този режим са подобни на характеристиките на асинхронния двигател в режим на динамично спиране. Интензивността на спиране зависи от стойността на спирачното съпротивление включено в статора и от магнитния поток създаван от постоянният ток в ротора. Ако постоянният ток в ротора се подава от генератор куплиран за вала на синхронния двигател, с намаляване на скоростта се понижава ЕДН на

генератора, възбудителния ток и спирачния момент и се увеличава времето за спиране. По-интензивен спирачен режим се получава, когато роторната намотка се захранва от независим източник на постоянен ток.

Синхронните двигатели се реверсират като се превключват две от фазите на статора при спрян (неподвижен) двигател. Ако генераторът, който подава постоянен ток на ротора, е куплиран към вала на синхронния двигател, то при реверсиране е необходимо да се промени поляритета на котвената или възбудителната намотка, за да се избегне размагнитването.

4.4. Начини за регулиране на скоростта на двигателите за променлив ток

Електроздвижванията с двигатели за променлив ток са по-прости, евтини и икономични, но притежават същите регулировъчни свойства, както при двигателите за постоянен ток. Най-голямо приложение от двигателите за променлив ток са намерили асинхронните двигатели. Синхронните двигатели обикновено се използват за задвижвания, които не изискват регулиране на скоростта. Колекторните двигатели за променлив ток имат добри регулировъчни характеристики, но са по-скъпи, имат ниски експлоатационни качества и малко приложение в промишлените производства.

Практическо приложение за регулиране на скоростта на асинхронните двигатели са намерили:

а) параметричните начини на регулиране, при които регулирането на скоростта се постига чрез изменение на някои параметри на двигателя или на неговите вериги – изменение на активното или индуктивното съпротивление в ротора, превключване на броя на полюсите, импулсен начин на регулиране и др.;

б) начини за регулиране, свързани със захранване на двигателя с отделен регулируем източник на енергия. Най-голям практически интерес представлява честотното управление на двигателя.

В по-долу ще бъдат разгледани само начините на регулиране на скоростта, които имат най-голямо приложение.

4.4.1. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез изменение на активното съпротивление в ротора

Регулирането на скоростта чрез изменение на съпротивлението е възможно само при асинхронните двигатели с навит ротор.

Във веригата на ротора на асинхронния двигател с навит ротор към четките на пръстените му се включват активни съпротивления с еднакви степени. Анализа на изкуствените механични характеристики на асинхронното електроздвижване може да бъде се направи относно естествената характеристика по 3 характерни точки:

- a) $s = 0, M = 0$ – при тази скорост на двигателя, отговаряща на синхронната скорост $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$, всички изкуствени характеристики ще имат скорост ω_0 ;

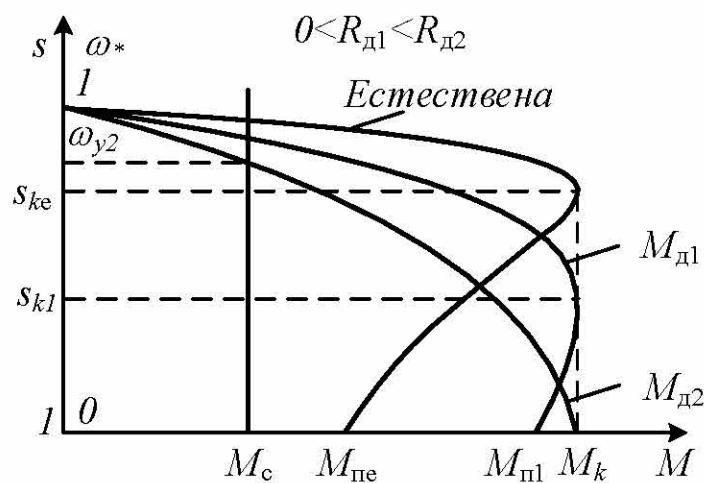
б) втората точка съответства на две координати – критичния момент, който зависи от допълнителното активно съпротивление, т.е. $M_k = const$ и критичното хълзгане $s_k = \pm \frac{r_2' + R_d}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}$, което е пропорционално на допълнителното активно съпротивление R_d . Следователно, увеличението на добавъчното съпротивление в намотката на ротора ще доведе до нарастване на критичното хълзгане;

в) при $s = 1$, скоростта на двигателя ще бъде равна на нула, а момента $M = M_\pi$. Пусковият момент на двигателя се определя от опростената формула на Клос, при $s = 1$, т.е.

$$M_{\Pi} = \frac{2M_k s_k}{1 + s_k} \quad 4.16$$

При анализът на уравнение (4.16) се вижда, че малките стойности на s_k водят до увеличаване на пусковият момент на двигателя с нарастване на допълнителното съпротивление.

На фиг.4.8 са показани семейство реостатни характеристики на асинхронен двигател с навит ротор.



Фиг.4.8 Реостатни характеристика на асинхронен двигател с навит ротор

Показателите на реостатното регулиране скоростта на асинхронния двигател с навит ротор практически са същите както на двигателите за постоянен ток.

Регулирането е еднозонно - под основната скорост. Диапазона на регулиране е $(3 \div 4):1$, при номинално натоварване. Плавността на регулиране зависи от броя на регулировъчните степени и е съпроводено със загуба на енергия в добавъчното съпротивление R_d .

Регулирането чрез изменение на активното съпротивление в роторната верига, въпреки изброените недостатъци, е намерило приложение при електроздвижване на подемни кранове.

4.4.2. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез превключване броя на чифтовете полюси

При регулирането на скоростта чрез изменение броя на чифтовете се използва зависимостта на скоростта на електромагнитното поле ω_0 от броя на чифтивите полюси и честотата на захранващото напрежение.

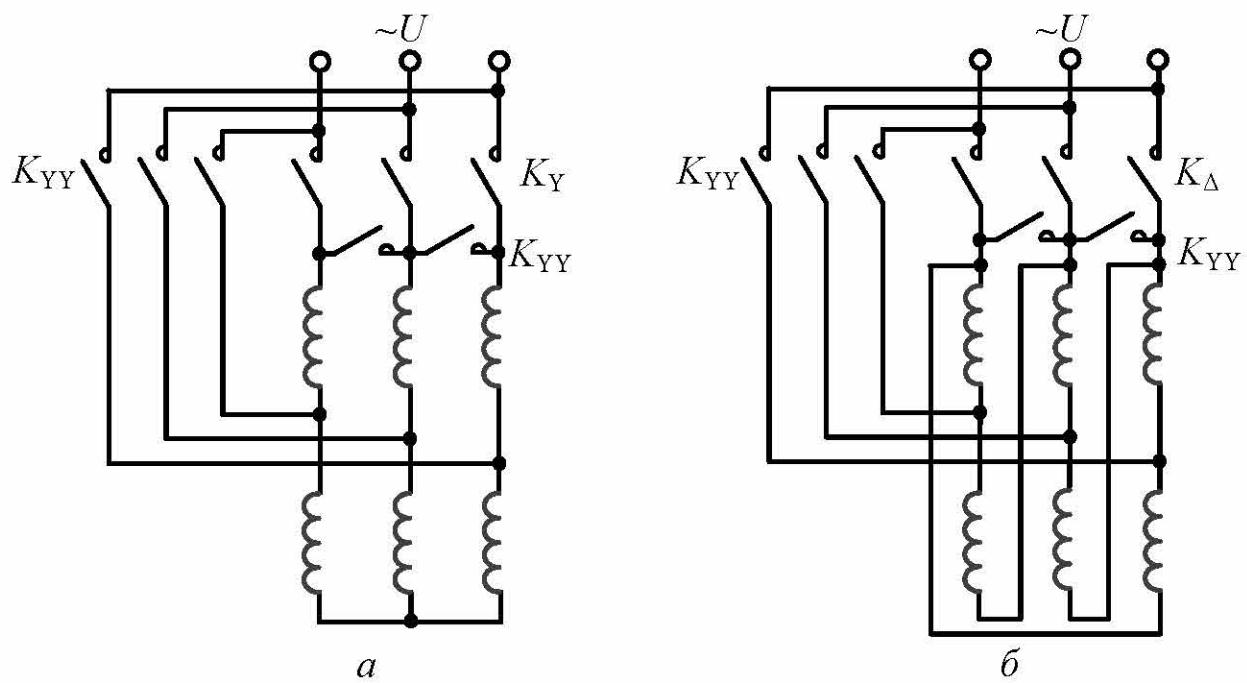
$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_1}$$

Съществуват асинхронни двигатели със специална конструкция на статора, които позволяват да се изменя числото на чифтовете полюси, в следствие на което могат да се постигнат две или повече (3, 4) работни скорости на двигателите. Подобни двигатели се наричат *многоскоростни*. Конструктивното изменение на броя на чифтовете полюси може да бъде постигнато по два начина. При първия, в каналите на статора се поставят две или три независими намотки с различен брой на чифтовете полюси p_1 , което значително увеличава габаритните размери на двигателя.

При другия начин, за получаване на различно число чифтове полюси се използва една и съща намотка, а изменение на p_1 се постига чрез превключване секциите на тази намотка. В практиката най-голямо приложение са получили две схеми на намотките – „звезда-двойна звезда“ (Y/YY) (фиг.4.9а) и „триъгълник-двойна звезда“ (Δ/YY) (фиг.4.9б)

Принципът за изменение на числото на полюсите, например за схемата „звезда-двойна звезда“ (фиг.4.9а), може да се проследи по схемата на включване на секциите за една фазна намотка на статора, фиг.4.10.

В тази схема всяка фазна намотка се състои от две секции, които могат да се превключват паралелно или последователно. При паралелното съединение напрежението се подава на средната точка на намотката, а началата на намотките се съединяват. Образуват се две паралелно включени системи намотки, съединени в „двойна звезда“ (YY). При последователното съединение на секциите на намотките броят на чифтовете полюси се увеличава 2 пъти, за това и синхронната скорост ω_0 на двигателя е 2 пъти по-малка.



Фиг.4.9 Схеми на свързване на асинхронен двигател за регулиране на скоростта

На фиг.4.9б е показано превключването от „триъгълник“ (Δ) в „двойна звезда“ (YY). В този случай, след преминаване във „двойна звезда“ (YY), броят на полюсите се намалява 2 пъти, следователно синхронната скорост се увеличава 2 пъти. Тъй като допустимия продължителен ток през намотките I_h трябва да остава постоянен, то мощността, която се консумира от двигателя при свързване в „звезда“ (Y) е:

$$P_{1Y} = 3U_\phi I_h \cos \varphi_{1Y} = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_h \cos \varphi_{1Y} = \sqrt{3} U I_h \cos \varphi_{1Y} \quad 4.17$$

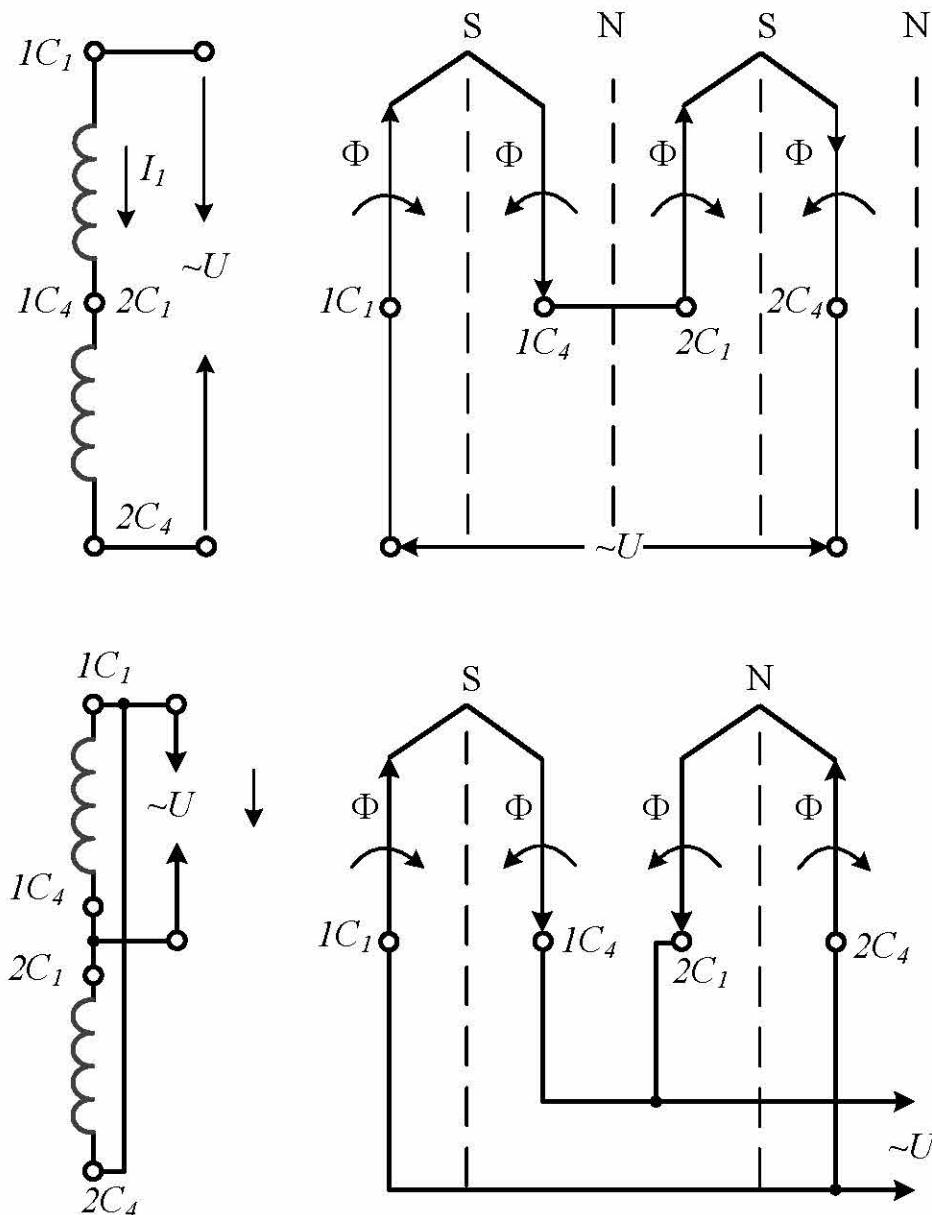
При свързване „двойна звезда“ тази мощност ще бъде

$$P_{1YY} = 3U_\phi 2I_h \cos \varphi_{1YY} = \frac{3U}{\sqrt{3}} 2I_h \cos \varphi_{1YY} = 2\sqrt{3} U I_h \cos \varphi_{1YY} \quad 4.18$$

Ако се пренебрегнат загубите в двигателя и се приеме, че $\cos \varphi_{1Y} \approx \cos \varphi_{1YY}$, то развираната от двигателя мощност при двойно и по-висока скорост, съгласно уравнения (4.17) и (4.18) е 2 пъти по-голяма от мощността при ниска скорост. Следователно, моментът развиwan от двигателя остава един и същ. Поради това схемата от вид „звезда“ (фиг.4.9а) в „двойна звезда“ е уместно да се използва при задвижвания, работещи с постоянен товарен момент на вала. Механичните характеристики на двускоростния асинхронен двигател при превключване на секциите на намотките от единична „звезда“ към „двойна звезда“ са показани на фиг.4.11.

За схемата „триъгълник-двойна звезда“ от фиг.4.9б, мощността която консумира двигателя при свързване в „триъгълник“ е:

$$P_{1\Delta} = 3U_\phi I_h \cos \varphi_{1\Delta} \quad 4.19$$



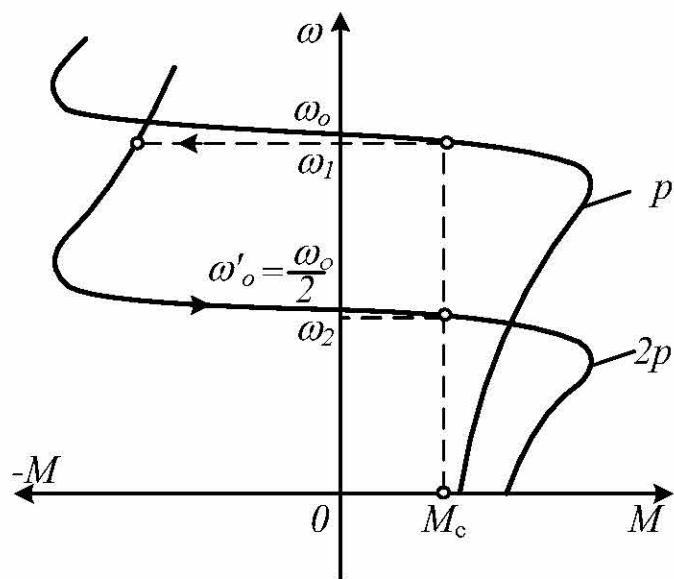
Фиг.4.10 Превключване на секции на асинхронен двигател

При свързване „двойна звезда“, съгласно уравнение (4.18) е:

$$P_{1YY} = 2\sqrt{3}UI_h \cos \varphi_{1YY} = 3.46UI_h \cos \varphi_{1YY} \quad 4.20$$

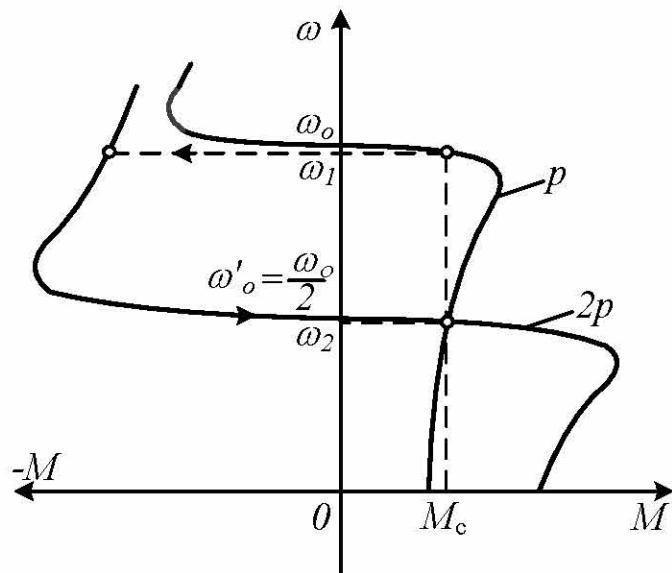
От съпоставката на (4.19) и (4.20), при приетите по-горе допускания, се вижда, че при това превключване - „триъгълник-двойна звезда“, развираната от двигателя мощност се изменя незначително (около 15%). Поради това е удачно използването на тази схема при задвижвания, работещи с постоянна мощност. Механичните характеристики на двускоростен двигател при схема на включване „триъгълник-двойна звезда“ са дадени на фиг.4.12.

На фиг.4.11 и фиг.4.12, преминаването на двигателя върху характеристиките с по-малка скорост е означено с прекъснати линии и стрелки. От фигурите се вижда, че двигателят работи на определен участък от новата си характеристика в рекуперативен режим и при скорости $\omega < \omega_0'$ - преминава отново в двигателен режим.



Фиг.4.11 Механични характеристики на асинхронен двигател превключван по схемата „звезда-двойна звезда“

Нормалната работа на асинхронен двигател е възможна само при равенство на полюсите на статорната и роторната намотки. Кафезната роторна намотка на двигателите с накъсо съединен ротор автоматично осигурява еднакви полюси на ротора с тези на статора. Това предимство е наложило многоскоростните двигатели да се изработват само с накъсо съединен ротор.



Фиг.4.12 Механични характеристики на асинхронен двигател превключван по схемата „триъгълник-двойна звезда“

Регулирането на скоростта, чрез превключване на броя на чифтовете полюси е много икономично и осигурява механични характеристики с голяма твърдост.

4.4.3. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез изменение честотата на захранващото напрежение

Регулирането на скоростта на асинхронния двигател с накъсо съединен ротор, чрез изменение на честотата на захранващото напрежение е най-икономичният и перспективен начин. Това е възможно, защото синхронната скорост е пропорционална на честотата на захранващото напрежение:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$$

С отчитане на факта, че с изменение на честотата на захранващото напрежението се изменя и магнитният поток Φ_1 по:

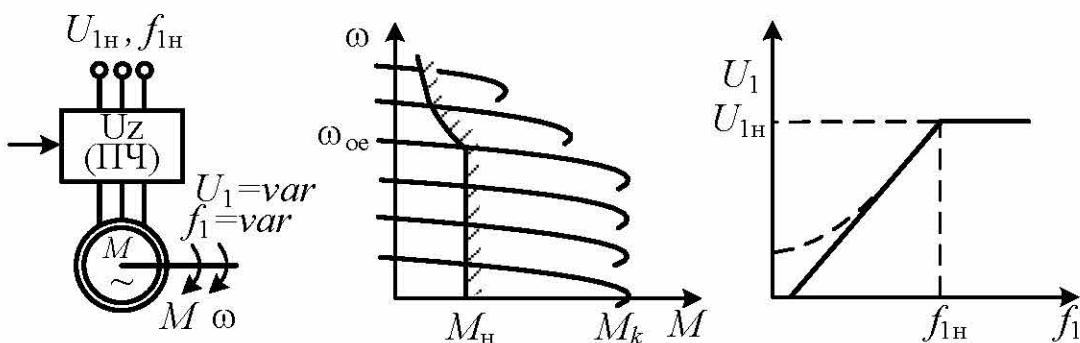
$$\Phi_1 = \frac{E_1}{kf_1} \approx \frac{U_1}{kf_1}, \quad 4.21$$

то в голяма част от случаите едновременно с изменение на честотата на захранващото напрежение е необходимо да се регулира и неговата амплитуда.

Регулирането на напрежението се извършва така, че хълзгането на двигателя да е минимално.

За реализация на честотното регулиране на скоростта на асинхронен двигател с накъсо съединен ротор в захранващата му верига се включва преобразувател на честота U_Z (ПЧ), показан на фиг. 4.13а. Основно се използват полупроводникови преобразуватели на честота.

За да се запази постоянна претоварващата способност и твърдостта на механичните характеристики на двигателя, е необходимо едновременно с честотата да се изменя и амплитудата на захранващото напрежение.



Фиг. 4.13 Включване на честотен преобразувател за асинхронен двигател

Критичният момент на асинхронния двигател за двигателен режим, съгласно израз (4.7), се определя от уравнението:

$$M_k = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_0 \sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1} = \frac{m_1 U_1^2}{2 \frac{2\pi f_1}{p} \sqrt{r_1^2 + x_k^2} + r_1} \quad 4.22$$

Ако се пренебрегне активното съпротивление на статорната намотка r_1 и се вземе под внимание, че индуктивното съпротивление x_k е пропорционално на честотата f_1 , пълният израз за критичния момент е:

$$M_k = \frac{p \cdot m_1 U_1^2}{4\pi f_1 x_k} = C \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad 4.23$$

За да се поддържа постоянна претоварваща способност на двигателя е необходимо при всички скорости отношението на критичния момент на двигателя към съответния статичен момент да бъде едно и също, т.е.:

$$\frac{M_{c1}}{M_{c2}} = \frac{M_{k1}}{M_{k2}} = \frac{U_1''^2}{f_1''^2} : \frac{U_1'^2}{f_1'^2},$$

Получава се уравнението на академик М.П.Костенко, наричано закон на Костенко:

$$\frac{U_1''}{U_1'} = \frac{f_1''}{f_1'} \sqrt{\frac{M_{c2}}{M_{c1}}} \quad \text{или} \quad \frac{U_1}{U_n} = \frac{f_1}{f_n} \sqrt{\frac{M_{c1}}{M_n}} \quad 4.24$$

където U_1' и U_1'' са необходимите стойности на напрежението при честоти f_1' и f_1'' ;

U_n – номиналното захранващо напрежение;

U_1 – напрежението на изхода на преобразувателя с честота f_1 ;

M_{k1} и M_{k2} – критичните моменти на характеристиката при честоти f_1' и f_1'' ;

M_{c1} и M_{c2} – статичните моменти при скорости съответстващи на честоти f_1' и f_1'' ;

M_c – статичният момент на вала на асинхронния двигател при честота f_1 .

Статичните механични характеристики на производствените механизми бяха дефинирани по характера на статичния момент на механизмите, зависещ от скоростта $M_c = f(\omega)$:

- независеща от ъгловата скорост механична характеристика $M_c = const, P_c = k\omega$;
- нелинейно падаща (хиперболична) механична характеристика или *работка с постоянна мощност* $M_c = k\omega^{-1}, P_c = const$;
- нелинейно нарастваща механична характеристика или *вентилаторна характеристика* $M_c = k\omega^2, P_c = k\omega^3$.

Съгласно уравнение (4.24) изразите за електромагнитните моменти на двигателя за съответните статични моменти са:

- за $M_c = const$ - зависимостта на напрежението и честотата на асинхронния двигател е $U_1/f_1 = const$;
- при хиперболично падаща товарна характеристика $M_c = f(k\omega^{-1})$ зависимостта на напрежението и честотата има вида $U_1^2/f_1 = const$;

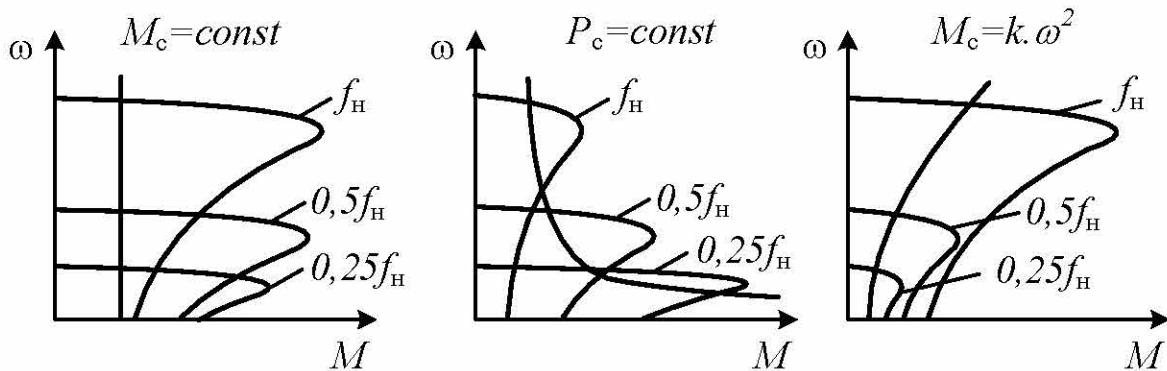
в) за вентилаторна характеристика $M_c = f(k\omega^2)$ напрежението и честотата ще се изменят в съответствие със зависимостта $U_1/f_1^2 = const$.

За най-ефективното реализиране на принципа на честотното управление на асинхронен двигател, е необходимо в съответствие вида на натоварването на вала на двигателя, да управляваме напрежението приложено на статора, взаимосвързано с изменението на честотата. Представеният закон за управление (4.24) важи в първо приближение, когато активното съпротивление на статора може да се пренебрегне. В действителност при малки стойности на честотата ($f_1 < 0.5f_n$) пада на напрежението върху r_1 съществено намалява стойността на напрежението реализиращо движението и съответно критичният момент на асинхронния двигател. При по-точен анализ, отчитайки пада на напрежението върху съпротивлението r_1 , механичните характеристики придобиват вида показан на фиг.4.14.

Така например при закона за управление $U_1/f_1 = const$, се наблюдава намаляване на критичния момент при спадане на честотата f_1 . За да регулираме скоростта на двигателя и да запазим критичния момент на двигателя постоянен, е необходимо напрежението да се намалява в по-малка степен отколкото честотата:

$$U_1 \approx U_1 f_1 + I_{1n} r_1 (1 - f_1) \quad 4.25$$

Такъв начин на регулиране на напрежението се нарича пропорционално регулиране с Ir -компенсация.



Фиг.4.14 Механични характеристики на асинхронен двигател с честотен преобразувател

В редица случаи и в частност при вентилаторна характеристика на товара, няма необходимост от намаляване на скоростта, за да се поддържа критичният момент равен на номиналния. В този случай е по-целесъобразно да се поддържа постоянно съотношението между статичния и критичния момент на двигателя $M_c/M_k = const$. Базирайки се на закона на Костенко, за съотношението между честотата и напрежението можем да запишем

$$U_1 = f_1 \sqrt{M_c'}, \quad 4.26$$

където M_c' е относителният статичен момент при дадена честота (скорост), равен на отношението $M_c' = M_c/M_h$, т.к. при задвижване с вентилаторна характеристика при намаляване на скоростта два пъти, статичният момент M_c се намалява четири пъти. В съответствие с уравнение (4.26) при намаляване на честотата 2 пъти напрежението може да се намали 4 пъти и се намаляват загубите в намотката на статора и магнитопровода на двигателя.

За постигане на високи скорости на въртене над 300rad/s на двигателя трябва да се подава напрежение с честота по-голяма от 50Hz. Много механизми, машини в текстилната промишленост, центрофуги и др., се нуждаят от скорост на въртене на работния орган с 600rad/s и повече. В този случай се използват преобразуватели с изходна честота по-голяма от 50Hz. Повишение на напрежението по-високо от стандартното, като правило е невъзможно или затруднено. В този случай използване на съотношението $U_1/f_1 = const$ е невъзможно и регулирането на скоростта с повищена честота над номиналната се провежда при постоянно напрежение $U_1 = 1$. За това регулирането при повишение на честотата над номиналната при запазване на постоянно напрежение, се счита като регулиране с постоянна мощност.

Описаните по-горе способи за регулиране на скоростта на асинхронен двигател се отнасят към т.н. *скаларно (модулно) управление*. Базира се на изменението на модула на някоя от величините определящи електромагнитният момент на двигателя - честота, напрежение, ток и магнитен поток. То е ефективно при малки диапазони на регулиране и без особени изисквания към динамиката на управление. Именно ниската динамика е основния недостатък на този вид управление. Например, в скоростен контур при скаларно регулиране, рязко изменение на натоварването ще доведе до неочитане или провал на скоростта.

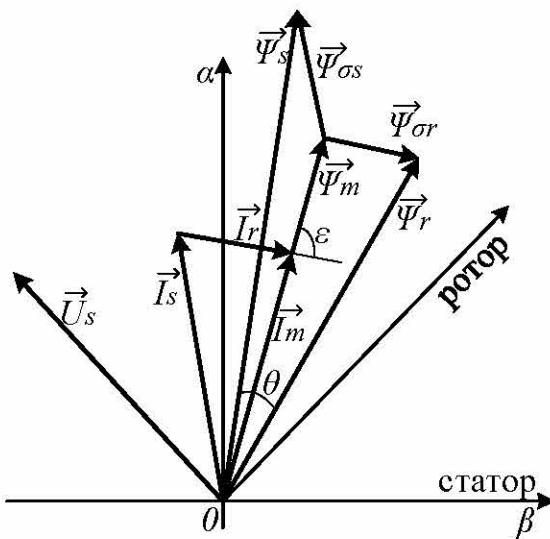
С развитието на цифровата техника все по-голямо приложение намира т.н. *векторно управление* на двигателите. Пълна управляемост на електrozадвижването се постига, ако се управлява електромагнитният момент на двигателя. За всички електромеханични устройства, въртящият момент се получава вследствие взаимодействието на магнитните полета на статора и ротора или тока на статора и магнитното поле на ротора. За реализацията на еднозначно управление, двете величини трябва да са независими. При асинхронните двигатели с накъсо съединен ротор има само един канал за управление, в който са обединени всички съставящи на тока и задачата на системата за управление е да се разбият (разединят) тези компоненти. Математически тази задача се решава, като електродвигателят се опише чрез вектори. В зависимост от избора на двойката вектори, образуващи

електромагнитния момент и координатната система в която са представени се различават:

- $(a,b,c) \rightarrow (a,\beta)$ проекция (Clarke transformation);
- $(\alpha,\beta) \rightarrow (d,q)$ проекция (Park transformation);
- $(d,q) \rightarrow (\alpha,\beta)$ проекция (inverse Park transformation).

Използвайки тези трансформациите се съставя уравнението на момента във вид на функция с независими проекции на тези величини на координатните оси.

Асинхронният двигател се описва със следните вектори на състоянието, фиг.4.15.



Фиг.4.15 Вектори на състоянието за асинхронен двигател

\vec{U}_s – вектор на напрежението на статора;

\vec{I}_s – вектор на тока в статора;

\vec{I}_r – вектор на тока в ротора;

\vec{I}_m – вектор на тока на намагнитването;

$\vec{\Psi}_s$ – вектор на магнитния поток в статора;

$\vec{\Psi}_r$ – вектор на магнитния поток в ротора;

$\vec{\Psi}_m$ – вектор на потокосцеплението във въздушната междина (поток на намагнитването).

През 1971г. Феликс Блашке (F. Blaschke) от Siemens предлага описание на електромагнитните процеси в асинхронния двигател във векторна форма, представени в координатна система ориентирана по направлението на магнитното поле. Този принцип е получил наименованието - *управление с ориентация по полето* - (FOC-Field-Oriented Control).

От избора на двойката вектори, за определяне на електромагнитния момент, се определя сложността на математическата система описваща процеса.

Използват се модел на асинхронния двигател управляем по тока на статора или по напрежението на статора.

Друга разновидност на векторното управление, която набира популярност с развитието на микропроцесорната техника, е пряко управление на момента (DTC – Direct Torque Control). Тя се различава от FOC по алгоритъма на управление и се ползва в задвижванията предлагани от фирма ABB. Методът е предложен от T. Noguchi и I. Takahashi през 1984г. Подобно е и управлението предложено от M. Depenbrock през 1985г., но с различно наименование - пряко самоуправление (DSC - Direct Self Control). Предложените стратегии се различават по формата на изобразяващата, която следва вектора на потокосцеплението при управление – DTC е под формата на кръг, а в DSC е хексагон. В основата на управлението е пространствения ъгъл θ , между потока на статора Ψ_s и ротора Ψ_r и възможността чрез неговото изменение да се управлява момента, ако се поддържат постоянни модулите на векторите на потокосцеплението $|\Psi_s| = \Psi_{sm}$ и $|\Psi_r| = \Psi_{rm}$.

При честотното регулиране на скоростта се осигурява плавно, без загубно регулиране в диапазон достигащ до 50:1, при висока твърдост на механичните характеристики.

Глава 5

УПРАВЛЕНИЕ НА СТЪПКОВИ ДВИГАТЕЛИ

5.1. Характеристики на стъпковите двигатели

Стъпкови двигатели са специални електромагнитни задвижващи устройства, захранвани от постояннотоков източник, които се придвижват на отделни стъпки. Те имат няколко намотки (най-често статорни), които са организирани в групи, наречени "фази". Двигателят се върти, стъпка по стъпка чрез последователно захранване на всяка от фазите. Това определя стъпковите двигатели като синхронни машини със скорост определена от дискретните захранващи импулси, подавани на отделните фази. При голяма честота на импулсите стъпковото движение преминава в непрекъснато - въртеливо. Ако преди стъпковите двигатели са достигали до пределни 300 оборота за минута, днес има такива работещи с 1000min^{-1} (rpm).

Компютърното управление дава възможност за постигане на много прецизно позициониране и/или контрол на скоростта. Затова стъпковите двигатели са основен избор за приложения, в които се изисква много точен контрол на линейно или ротационно преместване.

Един от основните параметри на често употребяваните стъпкови двигатели с въртеливо движение е размера на стъпката, която може да бъде реализирана. Тя се определя от броя на фазовите намотки (изработени по начин наподобяващ статорна намотка, но с определен брой зъби) и от на броя на зъбите/полюси на ротора (най-често реализиран от постоянен магнит), по следната зависимост:

$$\varphi_s = \frac{360^\circ}{Ph \times N_r} = \frac{360^\circ}{N}, \text{ въглови } ^\circ$$

или

$$\varphi_s = \frac{2\pi}{N}, \quad \text{rad}$$

$$N = Ph \times N_r \quad 5.1$$

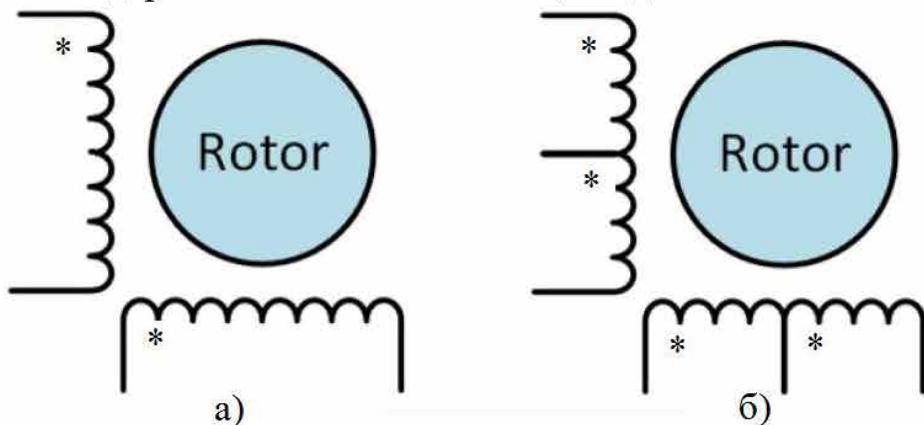
където Ph е броя на фазите;

N_r - брой на полюсите на ротора;

N - общ брой на полюсите за всички фази заедно-стъпково число.

Тъгълт на завъртане φ_s обикновено е между 2 и 15° , но съществуват и микродвигатели със стъпка $0.9 \div 1.8$ или по-малка.

Ролята на статорната намотка е да създаде магнитно поле с явно изразени полюси S/N , за да се завърти ротора от привличането на магнитните потоци. Статорите, според начина на навиване са с *бифиллярна* или *униполярна* намотка (фиг.5.1). За обръщане на създаваните полюси $S/N \rightarrow N/S$ при бифиллярното навиване (фиг.5.1а), трябва да се размени поляритета на захранващото напрежение. За униполярното свързване, (фиг.5.1б), може да се ползва един и същ поляритет на захранващото напрежение, но да се подава на единния или другия извод на намотката. Положението на ротора се фиксира в пространството посредством полето на възбудените фази, а след отпадане на захранването се задържа от магнитното поле, създавано от постоянния магнит.



Фиг.5.1 Типове навиване на статорна намотка при стъпкови двигатели

В зависимост от размера на реализираното преместване на ротора съществуват 4 режима на работа на стъпковите двигатели:

1. Стъпка вълна (Wave Step)
2. Цяла стъпка (Full Step);
3. Полустъпка (Half Step);
4. Микростъпка (Micro Step).

Ако приемем за стандарт, че стъпковите двигатели имат 200 роторни зъба, или 200 пълни стъпки за завъртане на вала на двигателя, разделяме 200-те стъпки на 360° и получаваме тъгъл на 1 стъпка равен 1.8° . Обикновено режим на *вълнова стъпка* се постига чрез последователно подаване на захранващото напрежение на всяка една от статорните намотки. По същество активирането

на един цифров изход на контролер за управление на стъпков мотор е еквивалентен на една стъпка.

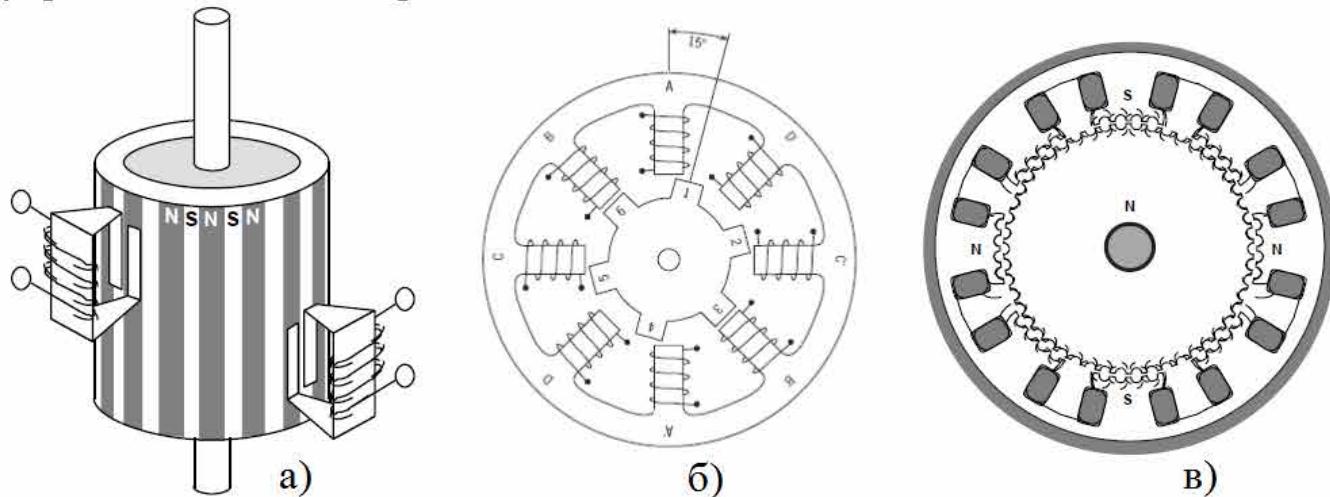
За преместване на относително големи разстояния се използва движението на *цели стъпки*. То е достатъчно бързо, след развъртане на стъпковият двигател, и с необходимия двигателен момент. Захранване се подава едновременно на две съседни статорни намотки.

Комбинацията от двата вида движение – тип вълна и на цели стъпки, се нарича преместване на *полустъпка*. Подаването последователно захранване една и след това на две съседни фази, завърта ротора на ъгъл $\varphi_s/2$ или това е половината от размера на нормалната стъпка. При управление на полуустъпки двигателят ще се върти с 400 стъпки за оборот или ротора ще изминава половината от ъгъла на стъпката - 0.9° . Управлението с полуустъпка се ползва за прецизно позициониране, въпреки че двигателят осигурява по-малък въртящ момент. Режимът на полуустъпки намалява показателя "нервозност" на двигателя, присъщо за работа в режим на *стъпка вълна*.

Възможно е разделянето на позициите между полюсите на *микростъпки*. Това се реализира, ако двигателят е изработен с повече от 2 фазни намотки на статора и се използват специализирани контролери (драйвери) за по-прецизно управление на тока в намотките. Теоретично е възможно разделянето на една стъпка на 256 микростъпки. При това предположение избраният двигател ще има 51200 стъпки на оборот (за двигател с 1.8° ъгъл на стъпката).

Стъпкови двигатели се изработват с различни размери, полюси и електрически характеристики. Когато роторът е без намотки и е изработен от е постоянен магнит с определен брой полюси, се нарича *стъпков двигател с постоянен магнит* (Permanent Magnet Stepper Motor-PM) (фиг.5.2а). Този тип двигатели са с относително най-малки размери (най-къса база). Техните предимства са: малка стъпка и съответно висока прецизност на позициониране, не е необходимо захранване за задържане на ротора и имат голям момент. Техен недостатък е необходимостта от допълнителен ток, който да преодолее както магнетизма на постоянния магнит, така и забавянето за преодоляването му при развъртане. Друг тип са *стъпкови двигатели с променливо магнитно съпротивление* (Variable Reluctance Stepper Motor-VR) (фиг.5.2б). При тях ротора е изработен от назъбено магнитно място желязо, оформен като полюси. Тези двигатели са с по-издължен вид (дълга база) и типичен размер на стъпката е 15° . Липсата на магнитно поле има предимство, намалява се тока необходим за преместване и по-бързо може да се направи стъпката. Недостатък е, че след отпадане на захранването няма кой да задържи (застопори) ротора поради липсата на остатъчен въртящ момент (residual torque) и при активен товар може да се завърти. Комбинация на двата вида са *хиbridните стъпкови*

електродвигатели (Hybrid Stepper Motor, Hybrid Permanent Magnet Stepper Motor-HB) (фиг.5.2в). Роторът им е назъбен както при мотора с променливо магнитно съпротивление, но съдържа и аксиално намагнитизиран концентричен магнит около оста си. Използват се широко в индустрията, като управлението им не се различава от това на двигателите с постоянен магнит.

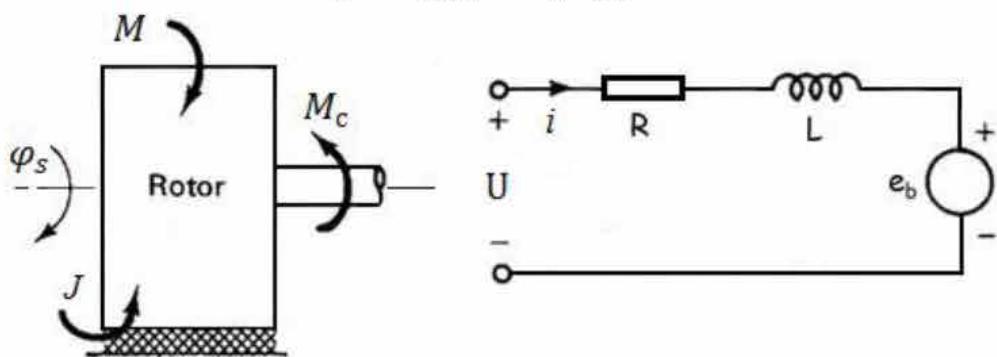


Фиг.5.2 Видове стъпкови двигатели

Механичното завъртане (φ_s) на подсистемата се осъществява от работния въртящ момент M_d , в противовес на инерционния момент на ротора J и съпротивителния момент на натоварването M_c , фиг.5.3. Трансформирано към електрическата подсистема това са генерираното магнитното поле, представено от магнитен момент M_d , пропорционален на фазата тока I и на константата k_t , за двигатели с постоянни магнити, а n е броят на роторните зъби.

$$M_d = k_t i \sin(n\varphi_s)$$

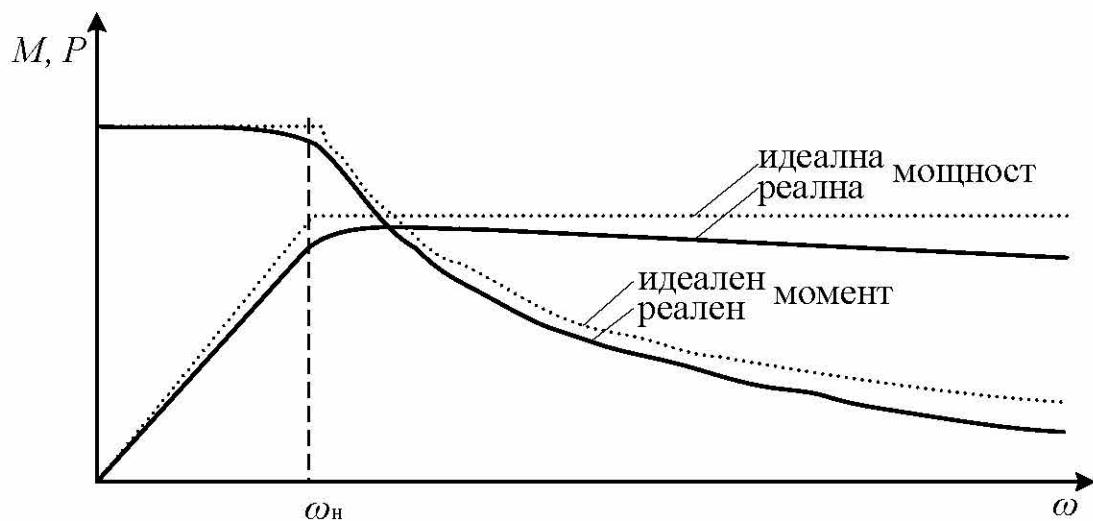
$$e_b = k_b \dot{\varphi}_s \sin(n\varphi_s) \quad 5.2$$



Фиг.5.3 Заместваща схема на движението при стъпков двигател

Електрическата верига се определя от постоянното захранване с напрежение U и тока, протичащ през фазата и зависещ от активното съпротивление R на фазата, фазовата индуктивност L и генерираното ЕДН e_b , свързано с магнитното поле и скоростта на движение чрез коефициента k_b .

Въртящият момент на двигателя се променя от натоварването - M_c и от скоростта на завъртане (импулса в секунда), фиг.5.4. При определена скорост на движение, но при постоянна стойност на момента на товара, двигателят губи синхронизация, т.е. започва да пропуска стъпки. За да се определи максималната възможна скорост за работа на двигателя се правят симулации с повишаване на скоростта, при прилагане на определен момент на натоварване.



Фиг.5.4 Зависимост на развилиния двигателен момент от скоростта на движение при стъпков двигател

Съгласно закона на Фарадей, при въртеливото движение на ротора на стъпковия мотор, за резултантното напрежение u на една фазова намотка, може да се запише:

$$u = iR + \frac{d\Phi}{dt} \quad 5.3$$

където i е тока протичащ през намотката;

R – активното съпротивление на намотката;

Φ – магнитният поток, създаван от взаимодействието между статора и ротора за преместването.

Преместването на ротора със стъпка φ_s е основно следствие на протичащия ток i в намотката. Отчитайки изменението на посоката на тока за напрежението на изводите на намотката може да се запише:

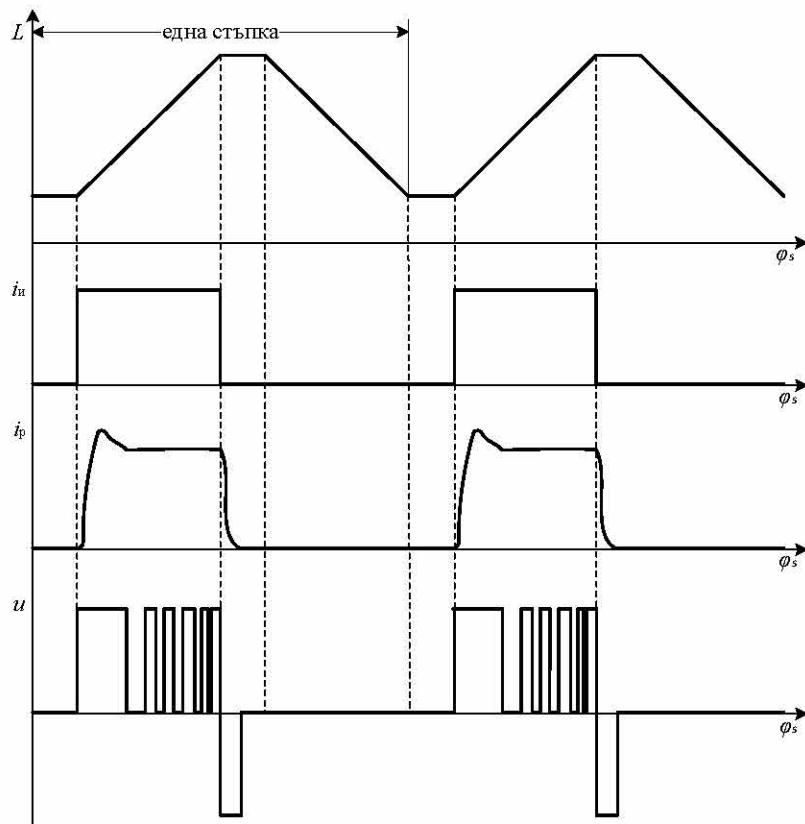
$$u = iR + \frac{\partial\Phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Phi}{\partial \varphi_s} \frac{d\varphi_s}{dt} \quad 5.4$$

където $\partial\Phi/\partial i$ се определя от моментната индуктивност на намотката $L(\varphi_s, i)$;

$\partial\Phi/\partial \varphi_s$ – моментна обратна електродвижеща сила, $k_b(\varphi_s, i)$.

Взаимозависимостта на електрическите параметри при завъртане на стъпковия двигател с една стъпка са илюстрирани на фиг.5.5. Водещо е

изменението на индуктивността L , вследствие протичането на реалния ток i_p през намотката.



Фиг. 5.5 Изменение на електрическите параметри по време на преместване на ротора с една стъпка

Ако израза (5.3) се умножи по тока i , се получава:

$$ui = i^2R + i \frac{d\Phi}{dt} \quad 5.5$$

Лявата страна на равенство (5.5) е електрическата мощност на стъпковия двигател. Първото събираме от дясно са електрическите загуби от активното съпротивление на намотката, а второто - движещата мощност. Мощността е съставена от две компоненти – механична мощност и мощността запасена от магнитното поле.

$$i \frac{d\Phi}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad 5.6$$

където dW_m/dt е моментната механична мощност;

dW_f/dt – моментна мощност, съхранена/запасена в магнитното поле.

По дефиниция мощността е отношение на енергията към времето и затова може да се каже, че W_m е механичната енергия, а W_f – енергията на магнитното поле. Също така е известно, че механичната мощност е произведение на момента M и скоростта на въртене.

$$\frac{dW_m}{dt} = M\omega = M \frac{d\varphi_s}{dt} \quad 5.7$$

Ако се използва полученият израз (5.7) за механичната мощност и го заменим в (5.6), се получава:

$$i \frac{d\Phi}{dt} = M \frac{d\varphi_s}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad 5.8$$

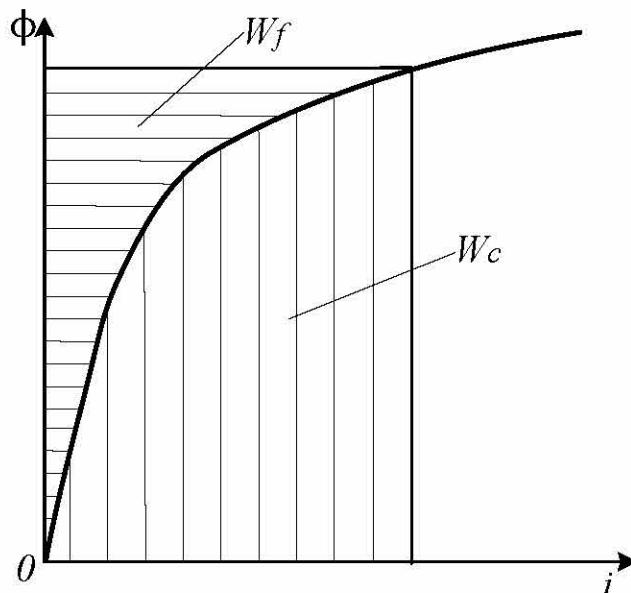
Изразът (5.8) се преобразува, за да се изрази момента M ,

$$M(\varphi_s, \Phi) = i(\varphi_s, \Phi) \frac{d\Phi}{d\varphi_s} - \frac{dW_f(\varphi_s, \Phi)}{d\varphi_s} \quad 5.9$$

При постоянен поток Φ израза (5.9) придобива вида:

$$M = - \frac{dW_f}{d\varphi_s} \quad 5.10$$

Целта е да се изрази въртящия момент по отношение на текущия поток. Въвежда се понятието *ко-енергия* W_c , която се ползва вместо *енергията на магнитното поле*. Графичната интерпретация на енергийното поле по отношение тока е показана на фиг.5.6.



Фиг.5.6 Графична интерпретация на енергията на магнитното поле W_f и ко-енергията на магнитното поле W_c

Интегрирането на уравнение (5.8) показва енергията на магнитното поле за постоянно ѝгъл на вала $d\varphi_s/dt = 0$:

$$W_f = \int_0^\Phi i(\varphi_s, \Phi) d\Phi \quad 5.11$$

Аналогично от намагнитващата крива на фиг.5.6 може да се определи и ко-енергията W_c , която е „сянката“ на W_f :

$$W_c = \int_0^i \Phi(\varphi_s, i) di \quad 5.12$$

Връзката между двете площи W_f и W_c е енергията на полето:

$$\Phi i = W_f + W_c \quad 5.13$$

Ако се диференцира уравнение (5.13) се получава:

$$\Phi di + id\Phi = dW_f + dW_c \quad 5.14$$

Използвайки израза от (5.14) и замествайки го в (5.9), се получава:

$$M = \frac{id\Phi - [\Phi di + id\Phi - dW_c(\varphi_s, i)]}{d\varphi_s} \quad 5.15$$

За опростяване на израза за въртящия момент, уравнение (5.15) се апроксимира за стойности на постоянен ток. Диференциала на ко-енергията може да бъде записан по отношение на негови частични производни като:

$$dW_c(\varphi_s, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \varphi_s} d\varphi_s + \frac{\partial W_c}{\partial i} di \quad 5.16$$

От уравнения (5.15) и (5.16) сравнително лесно да се покаже, че при постоянен ток:

$$M = \frac{\partial W_c}{\partial \varphi_s} \quad 5.17$$

Опростени аналитични изрази при пренебрегване на магнитно насищане

Връзката на потока от тока може да се изчисли по формулата:

$$\Phi = L(\varphi_s)i \quad 5.18$$

Приемайки, че индуктивността на двигателя варира само като функция на ъгъла на ротора и замествайки уравнение (5.18) в уравнение (5.12) се получава следния израз за ко-енергията:

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\varphi_s) \quad 5.19$$

Като се замести израза за W_c от (5.19) в уравнение (5.17), за момента на стъпковите двигатели се получава:

$$M = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{d\varphi_s} \quad 5.20$$

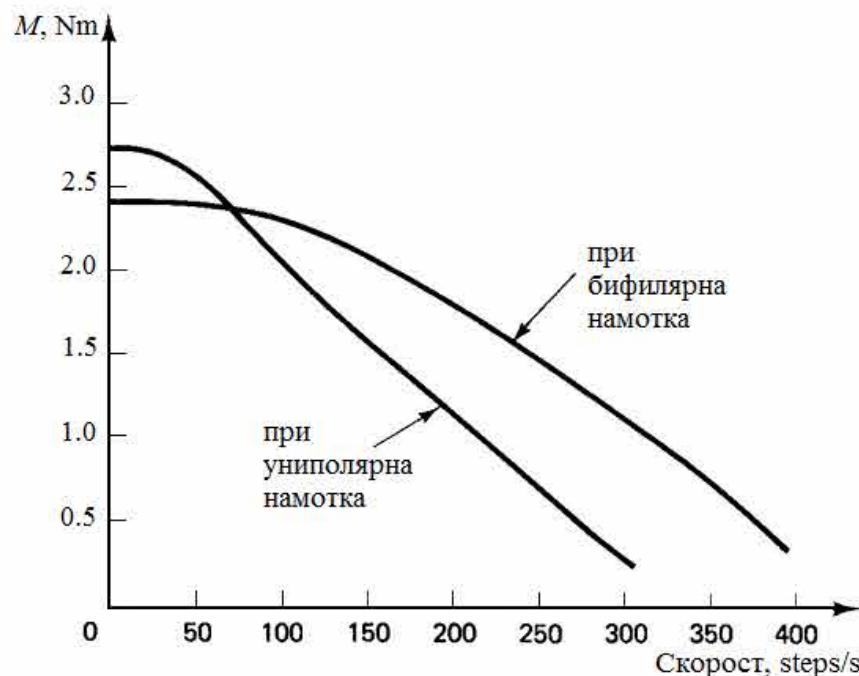
Средната стойност на момента, развиван от стъпков двигател се определя от тока I , индуктивността L и стъпковото число N на двигателя чрез израза:

$$M_{cp} = \frac{I^2 L N}{2 \cdot 4\pi}, \quad \text{Nm} \quad 5.21$$

Развиваният момент от стъпковите мотори зависи от много фактори, но е важно да се отбележат:

- промяна на момента чрез управление на ъгъла на задържане;
- промяна на момента чрез управление на тока в намотката;
- директно мигновено управление на въртящия момент (direct instantaneous torque control – DITC).

Типа намотки, използвани при производство на стъпкови мотори, променя въртящия момент на вала. По правило униполлярната намотка предизвиква по-голям момент при ниски обороти, но има по-малък диапазон от скорости, фиг.5.7.



Фиг.5.7 Зависимост на момента на стъпков двигател от вида на навиване на намотката

Амплитудата на постоянното захранващо напрежение също влияе на развиваият момент от стъпковия двигател. Един от методите за управление на момента е прилагането на стъпално напрежение (chopping voltage) към намотките на двигателя. При него се редуцира тока в намотката и това е полезно управление, ако се използва стъпковия двигател за по-широк спектър от скорости на въртене. Прилагат се два метода за управление на момента – твърд (hard chopping) и мек (soft chopping). Твърдия се използва при ниските скорости на въртене за осигуряване на висок момент, а мекия, когато се търси минимизация на тока в намотките.

Асиметричният мостов преобразувател показан на фиг.5.8 е най-честото схемно решение за двустъпално управление на напрежението.

При движение на микростъпки, моментът на двигателя намалява:

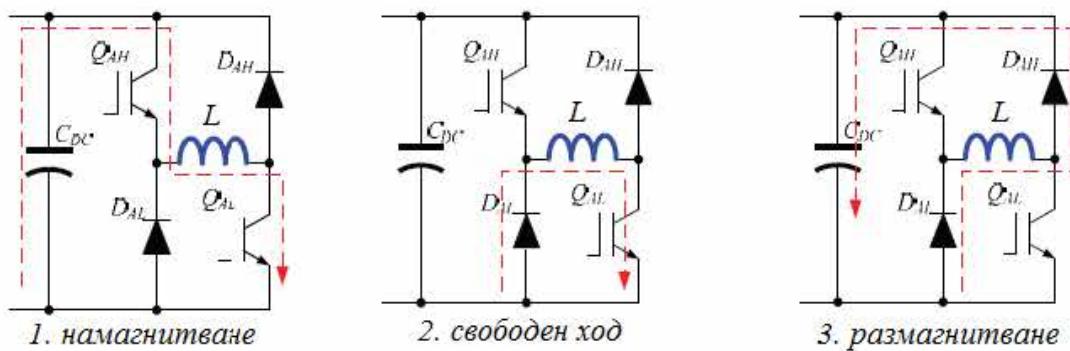
$$M_s = M \sin \frac{90s}{\mu_s} \quad 5.21$$

където M е момента реализиран при движение на една стъпка;

M_s – момента при движение на микростъпки;

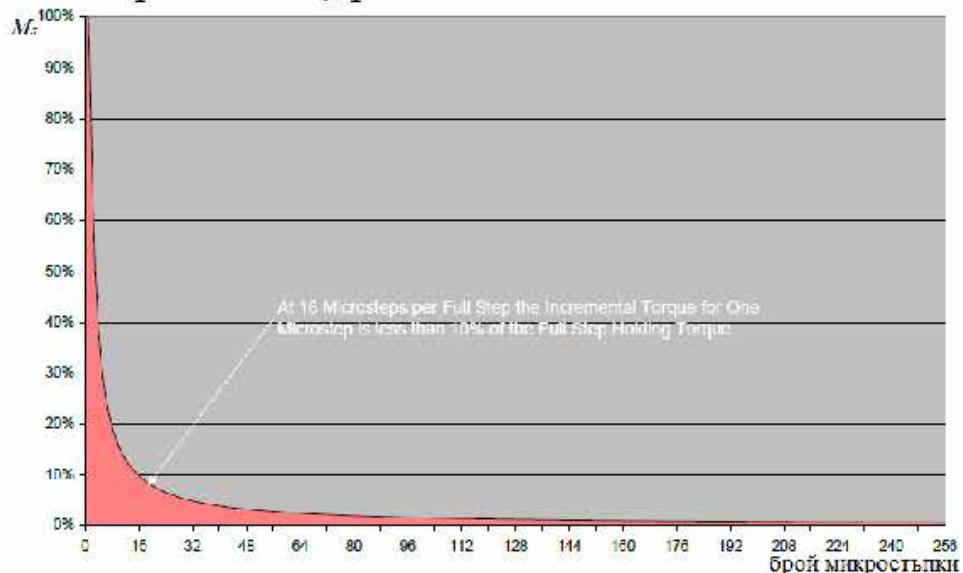
s – максималният брой микростъпки;

μ_s – броя изпълнени микростъпки, при това преместване.



Фиг. 5.8 Етапи при стъпална промяна на напрежението за управление на стъпков двигател

На практика микростълка по-малка от 1/16 намалява толкова много въртящият момент на двигателя, че той е под 10% от номиналния и това задвижване няма приложение, фиг. 5.9.

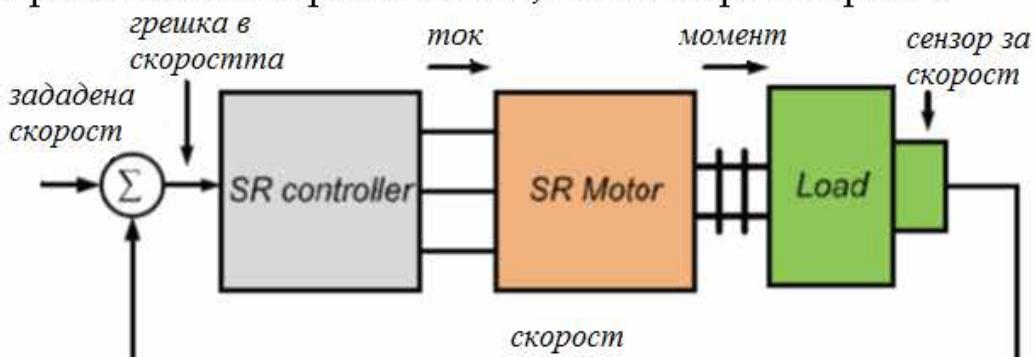


Фиг. 5.9 Изменение на двигателния момент при управление с микростълки на стъпков двигател

5.2. Пускане, спиране и регулиране скоростта и посоката на въртене на стъпковите двигатели

Стъпковите двигатели се движат, когато се подаде захранващ импулс на изводите на намотките им. Намотките на двигателя, трябва да се най-малко две разположени под ъгъл 90° една спрямо друга. Ако периодично се захранва само едната намотка, преместване няма да има. За завъртане на ротора е необходимо последователно захранване на съседни намотки. Движението е насочено на стълки в зависимост от честотата на захранване на намотките и стъпковото число на двигателя. Скоростта на движение при стъпковите двигатели основно се определя от честотата на използвания широчинно-импулсен модулатор за генериране на захранващи импулси към намотките на двигателя. Винаги

трябва да има управляваща система, чрез която да се променя скоростта на въртене на двигателите. Управляващата система е съставена от логика и драйверни стъпала и е пригодена за съответния стъпков двигател. Няма универсален стъпков двигател и няма универсално управление за този двигател. По-скоро са уникални както двигателя, така и конкретното управление за приложението за което са проектирани. Управлението на двигателите задава и посоката на въртене. Посоката се определя от поредността на подаваните импулси за захранване на отделните намотки. На фиг. 5.10 е показано управлението на стъпков двигател с 3-фазни статорни намотки. Освен в затворена система, каквато е показана на фиг. 5.10, много често стъпковите двигатели работят и в отворена система, т.е. без обратна връзка.



Фиг. 5.10 Пример на следяща система за управление на скоростта на стъпков мотор

Основен параметър на стъпковите двигатели е времеконстантата T (Electrical Time Constant) на самия мотор. Това е времето за което протичащия ток в намотката достигне до 86% от номиналния.

$$T = \frac{L}{R}, \text{ ms} \quad 5.22$$

където L е индуктивността на двигателната намотка, мН;

R – активното съпротивление на намотката, Ω .

Високата индуктивност на двигателите не е проблем при ниски скорости. Токът протича достатъчно бързо през намотките на двигателя и стъпковият двигател работи с номиналния въртящ момент. При високи скорости токът може да не протече достатъчно бързо през намотката, преди да е превключен към следващата фаза, като по този начин се намалява въртящия момент на двигателя. Увеличаване на захранващото напрежение може да подобри тази загуба на въртящ момент при по-високи скорости, като накара тока да протича по-бързо в намотките на двигателя при повишена честота. В обобщение, токът и броят на навивките в намотките определят максималния въртящ момент на стъпковия двигател, а захранващото напрежение и индуктивността на намотките се отразяват на скоростта, с която може да се генерира определен въртящ момент.

Връзката между мощността на двигателя P_s , захранващо напрежение U_{DC} и индуктивността на мотора L е:

$$P_s = \frac{U_{DC}}{\sqrt{L}}, \text{ W} \quad 5.23$$

Токът в намотката е пропорционален на времето, за което е подадено напрежение и обратно пропорционален на индуктивността на самата намотка.

$$I = \frac{U_{DC}}{L} t, \text{ A} \quad 5.24$$

или съответно за времето:

$$t = \frac{IL}{U_{DC}}, \text{ s}$$

За една стъпка на двигателя токът трябва да премине от 0 до I_{max} и *обратно* до 0, или от $-I_{max}$ до $+I_{max}$. Това налага да се изчислява с 2 пъти амплитудата на тока или:

$$I = 2 \times I_{max}$$

За времето за реализиране на една стъпка се получава:

$$t = \frac{2I_{max}L}{U_{DC}}, \text{ s} \quad 5.25$$

За определяне на максималната скорост (максималният брой стъпки в секунда) на стъпковите двигатели се използва зависимостта:

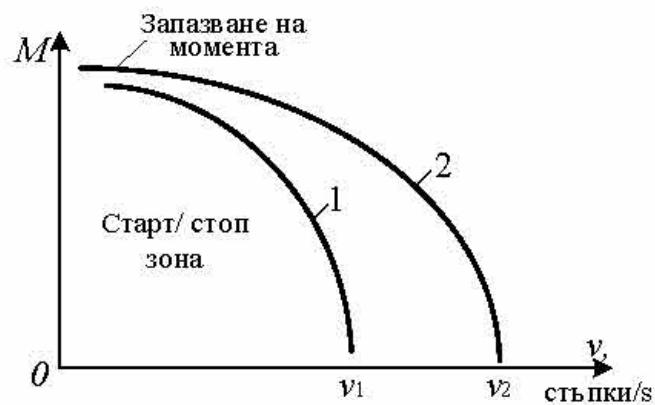
$$\nu = \frac{U_{DC}}{2I_{max}L} N, \text{ s}^{-1} \quad 5.26$$

където ν е пределната скорост на движение, без загуба на мощност;

I_{max} – максимално допустимия ток протичащ през намотките;

N - стъпково число на двигателя.

При стъпковите двигатели трябва да се разглеждат две криви на развиваният от двигателя момент, фиг.5.11. Крива 1 отразява изменението на момента при операции пускане (развъртане), когато все още няма инерция, и спиране на двигателя или т.н. Pull-In Torque - стартиране или спиране без загуба на стъпки. Всяка по-ниска скорост попадаща в старт/стоп зоната е допустима за развъртане на двигателя. Крива 2 показва изменението на момента при поддържане на скоростта или това е - Pull-Out Torque. Областта между двете криви се нарича неустойчива зона (slew range) или област в която трябва да попадат работните характеристики на двигателя, за да няма грешно изпълнени стъпки. В работен режим, преди спиране, е необходимо предварително намаляване на скоростта, като се отчита влиянието на инерционните сили на товара на задвижвания механизъм.

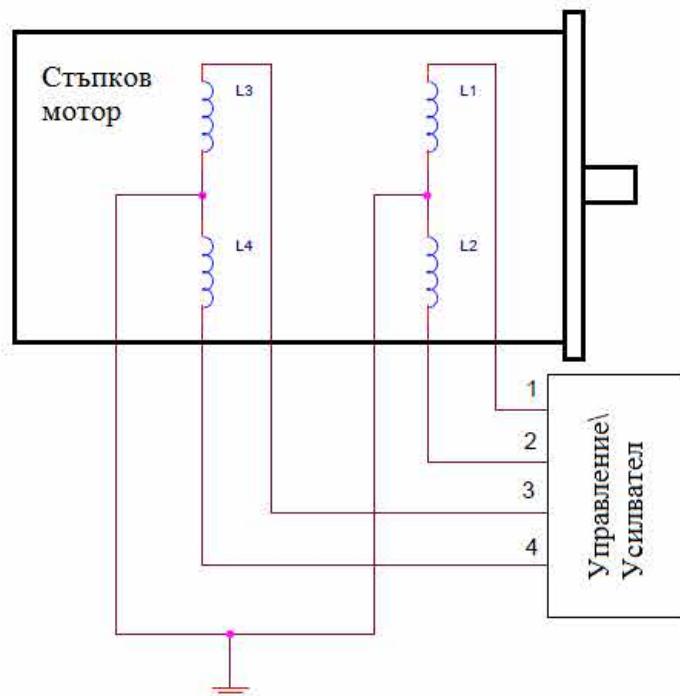


Фиг. 5.11 Изменение на развивания двигателен момент от стъпков двигател при изменение на скоростта

Стойността v_1 е максималната скорост, с която може да се стартира завъртането на стъпковия мотор, а v_2 - пределната скорост от двигателя, поддържана продължително време. Стартовата скорост v_1 е по-ниска поради механичните сили, които задържат двигателя в спрямо състояние.

Най-подходящо е стъпковите двигатели да работят в областта със запазване на момента. При по-висока скорост на развъртане на стъпков мотор се че намалява двигателният му момент. За различните типове двигатели намалението на момента при увеличаване на скоростта, се изразява като парабола или хипербола.

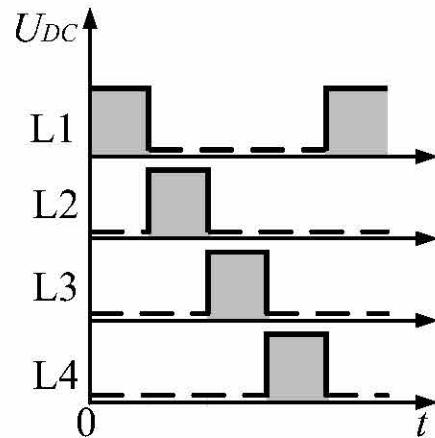
Използваме двуфазен двигател с 4 намотки свързани в униполярна схема, показан на фиг. 5.12., за определяне на посоката на въртене и видовете стъпки, които може да реализират със стъпковите двигатели



Фиг. 5.12 Схема на свързване на двуфазен стъпков двигател

Единична стъпка, тип *вълна* (wave stepping), може да се реализира, като се подават последователно импулси на съседните намотки. Прието е моментът на подаване на захранващо напрежение на намотката да се означава с H, а когато няма захранване - с L. За едно пълно завъртане по посока на часовниковата стрелка (на дясно) трябва да се реализира импулсната поредица, показана на фиг.5.13.

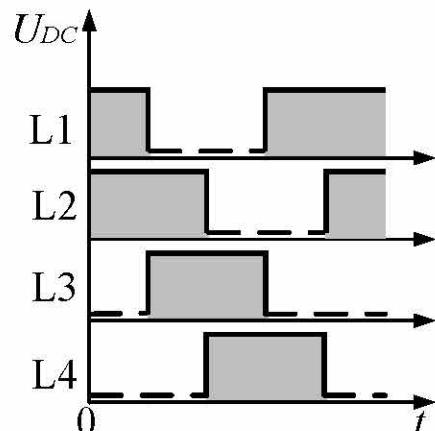
намотка стъпка	L1	L2	L3	L4
1	H	L	L	L
2	L	H	L	L
3	L	L	H	L
4	L	L	L	H



Фиг.5.13 Импулсна последователност за преместване тип вълна

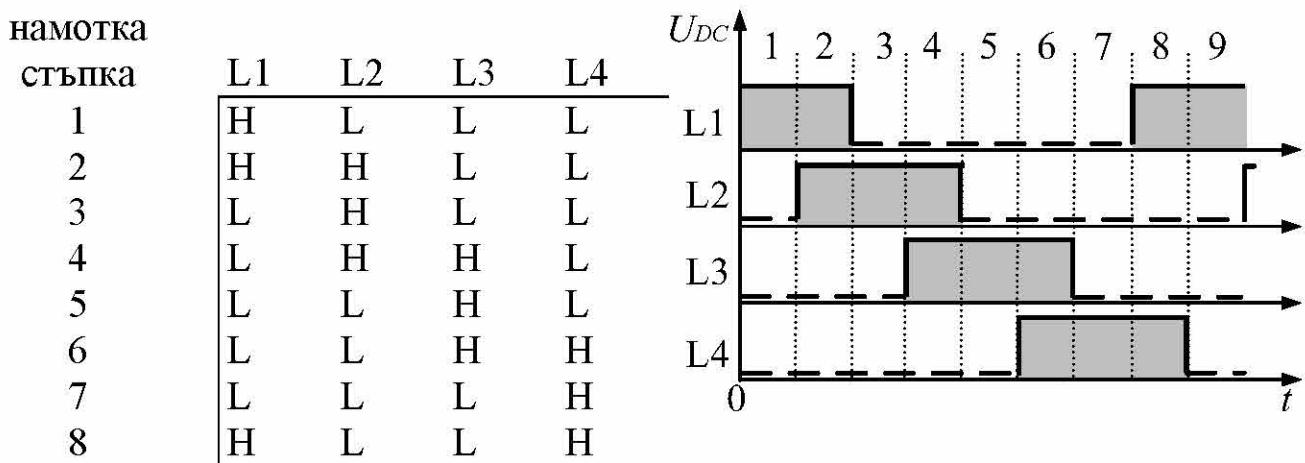
Основното придвижване на стъпковите двигатели е на *цели стъпки* (full stepping). За реализирането му е необходимо да се подава едновременно захранващо напрежение на две съседни намотки, както е показано на фиг.5.14.

намотка стъпка	L1	L2	L3	L4
1	H	H	L	L
2	L	H	H	L
3	L	L	H	H
4	H	L	L	H



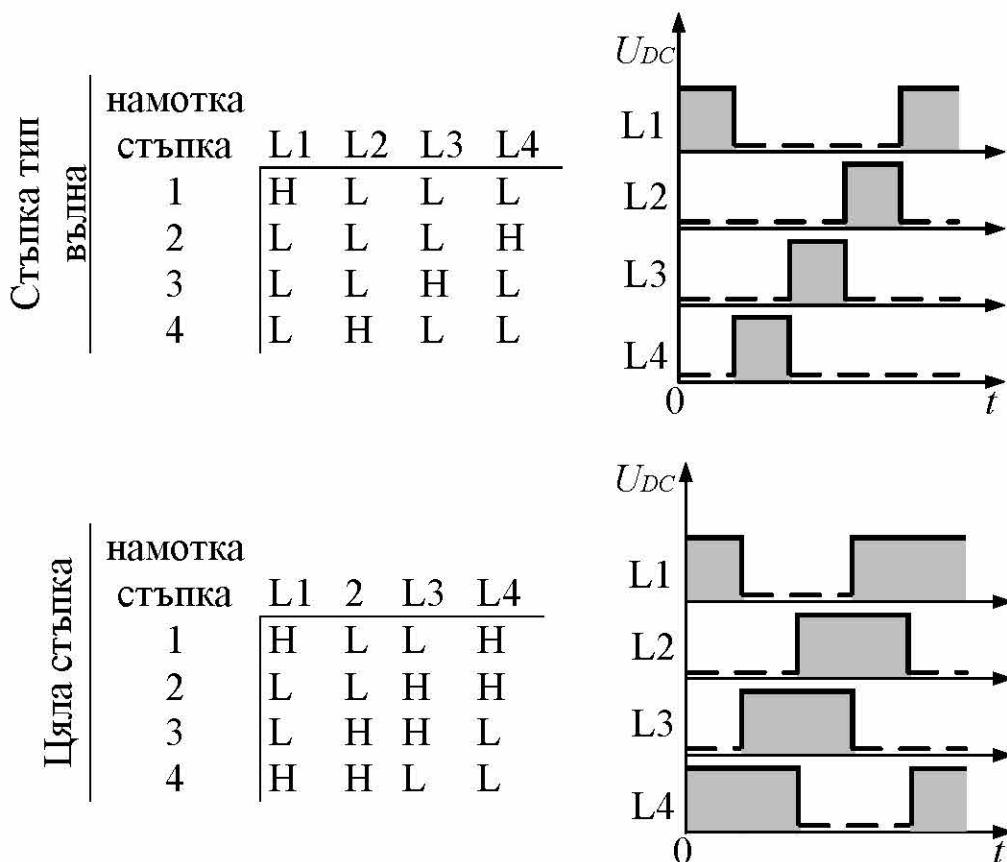
Фиг.5.14 Импулсна последователност за преместване на цели стъпки

За прецизно позициониране на задвижваните механизми със стъпковите двигатели се използва преместване на *полустъпка* (half stepping). За едно пълно завъртане на вала на двигателя се ползват 2 пъти повече стъпки, отколкото при преместването тип вълна или пък на цяла стъпка, както е показано на фиг.5.15.

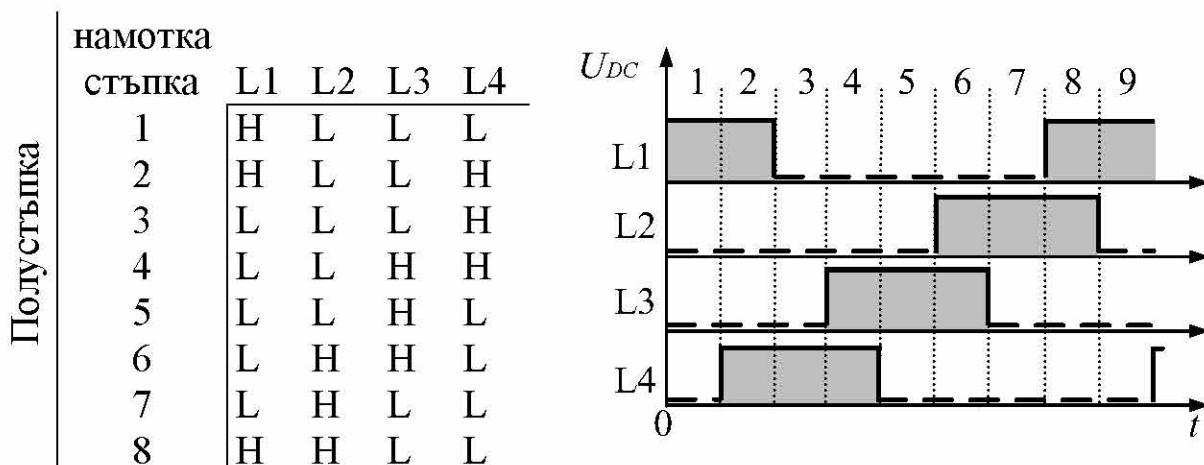


Фиг.5.15 Импулсна последователност за преместване на полуствърки

Показаните импулсни последователности са за движение на стъпковия двигател надясно. За движение на ляво (в обратна посока) трябва да се промени реда на подаваните захранващи импулси на намотките на двигателя по начина показан на фиг.5.16. Относя се за всички описани по горе видове премествания, реализирани чрез стъпковите двигатели.



Фиг.5.16 Импулсни последователности за движение на ляво-
(следва продължение)



Фиг. 5.16 Импулсни последователности за движение на ляво

Когато двигателят се придвижи с една стъпка, той превишава крайната устойчива точка и се колебае около тази точка. Щом не му се подават импулси е в покой. Този нежелана вибрация се усеща като "звънене" на двигателя и е по-изразена при не натоварените двигатели. Не натовареният или недостатъчно натоварен двигател може да се "срине", ако вибрациите, които се наблюдават, са достатъчни, за да причинят загуба на синхронизация.

Стъпковите двигатели имат естествена резонансна честота. Когато честотата на възбудждане на намотките съответства на тази резонансна честота, звъненето е по-изразено и стъпките могат да бъдат пропуснати. Задържането на ротора е по-вероятно и трябва да се избягва тази честота. Резонансната честота на двигател може да се изчисли по формулата:

$$f = \frac{100}{2\pi} \sqrt{\frac{2N_r M_c}{J}} \quad 5.27$$

където N_r - брой на полюсите на ротора;

J - инерционен момент на ротора, kg.cm^2 ;

M_c - съпротивителен момент, N.m .

Мотиви при избор на стъпков двигател

Изборът на стъпков двигател не може да бъде направен единствено въз основа на геометричните му размери. Трябва да се вземат предвид и необходимите момент и скорост на двигателя. Времето и усилията за избор на стъпков двигател за конкретно приложение може да бъдат намалени, ако селекцията се извършва по следния начин:

- Етап 1

Посочете основните изисквания за конкретното приложение: скорости, ускорения, необходима точност и разделителна способност, както и характеристики на задвижвания механизъм като размер, инерция, резонансни честоти и съпротивителен момент.

- Етап 2

Изчислете работните изисквания за въртящ момент и скорост на въртене за конкретното приложение. Вторият закон на Нютон е основното уравнение, използвано в тази стъпка. Необходимият въртящ момент се определя от:

$$M = M_c + J \frac{\omega}{\Delta t}$$

- Етап 3

Използвайки кривите на въртящия момент от скоростта за група търговски стъпкови двигатели, изберете подходящ стъпков двигател. Трябва да се отчетат изискванията за въртящия момент и скоростта, определени в Етап 2, и изискванията за точност и разделителна способност, посочени в Етап 1.

- Етап 4

Ако не е налице стъпков двигател, който отговаря на посочените групови изисквания - променете основната архитектура на механизма. Това може да бъде постигнато чрез промяна на изискванията за скорост и въртящ момент, с добавяне на редуктори или усилватели (например хидравлични усилватели).

- Етап 5

Изберете управляваща система, която е съвместима със стъпковия мотор и отговаря на функционалните изисквания в Етап 1. За прости приложения може да се използва система без обратна връзка, състояща се от източник на импулси (осцилатор) и усилвател. За по-сложни преходни задачи се използва микропроцесорно управление или персонализиран хардуерен контролер за генериране на желаната импулсна поредица. Управлението с обратна връзка е за предпочтение при прецизни задачи, които трябва да се реализират системата.

Най-полезната информация при избора на стъпков двигател е кривата на въртящия момент спрямо скоростта (стъпките за секунда). Другите важни параметри са:

- Брой стъпки за оборот;
- Начален въртящ момент на двигателя, при захранване с номинално напрежение;
- Максимална работна скорост (възможно е да са посочени максималните стъпки в стационарно състояние при номиналното натоварване);
- Въртящия момент двигателя при максимална скорост;
- Максимално ускорение и забавяне при номинално натоварване;
- Времевите константи на двигателя - електрическата и механичната;
- Работната честота на двигателя - без външно натоварване и близо до застопоряване;

- Механични параметри на двигателя - брой на фазите, брой зъби на статора и ротора, въздушна междина и корпус, тегло, инерционен момент на ротора;
- Необходимия капацитет за захранване (напрежение и мощност).

Глава 6

ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ СИСТЕМИ

6.1. Същност и практическо значение на преходните процеси е електроздвижването

Преходен или неустановен режим в електроздвижването се нарича, режимът на работа при преминаване от едно установено състояние в друго. Преходните процеси възникват при резки изменения в системата или при външни въздействия. Режимите на електроздвижванията, свързани с изменение на скоростта, тока, мощността и момента на натоварването са свързани с преходните процеси.

Преходни процеси възникват при пускане или спиране на двигателя, при регулиране на скоростта и при реверсиране на двигателя, а също така при надвишаване на нормалните условия на електроснабдяване (изменение на напрежението и честотата на мрежата), аварии и др.. Понякога преходният режим е основен за работата на електромеханичната система.

Характерът на протичане на преходните процеси е от съществено значение за производителността, надеждността и икономическата ефективност на работния механизъм. Преходните процеси се определят от следните видове инерции в електроздвижванията:

- а) *механична инерция* на движещите се части;
- б) *електромагнитна инерция*, вследствие наличие на индуктивност в електрическите машини и апарати за управление;
- в) *топлинна инерция* на електрическите машини и някои управляващи апарати.

Различните видове инерция се характеризират от съответните времеконстанти: *механична, електромагнитна и топлинна*.

Механична инерция се характеризира с електромеханичната времеконстанта T_M . Стойността на T_M зависи от механичните параметри на задвижването и електромеханичните свойства на двигателя, определени от съпротивлението на веригите му.

Електромагнитна инерция се характеризира с електромагнитната времеконстанта T_E . Стойността на T_E се определя от индуктивността L и активното съпротивление R на разглежданата електрическа верига.

$$T_E = \frac{L}{R}$$

Топлинна инерция се характеризира с времеконстантата на загряването T_3 и се представя с отношението на топлинния капацитет C на машината към топлоотдаването ѝ A , т.е.

$$T_3 = \frac{C}{A}$$

Топлинните процеси протичат много бавно, затова при анализа на преходните процеси топлинната инерция може да се пренебрегне.

Преходните процеси, за протичането на които е от значение само механичната инерция, са механични преходни процеси.

Преходните процеси, при които се взема под внимание както механичната, така и електромагнитната инерция, се наричат електромеханични.

За описание на преходните процеси в електроздвижванията се използват диференциални линейни и нелинейни уравнения. При нелинейните диференциални уравнения се използват графоаналитични и графични методи за тяхното решаване.

6.2. Време за пускане и спиране на електроздвижването

Времето за пускане и спиране на всяко електроздвижване е от съществено значение за производителността на производствения механизъм. Времето на преходния процес на задвижването (пускане, спиране и преминаване от една скорост на друга) може да се определи, като се пренебрегне електромагнитната инерция и се реши уравнението за движението на задвижването (1.5) по отношение на времето:

$$dt = J \frac{d\omega}{M - M_c} \quad 6.1$$

където J – е сумарният, приведен към скоростта ω инерционен момент на всички движещи се части на системата двигател-работна машина.

Времето за ускоряване на задвижването от скорост ω_1 до ω_2 се определя, като се интегрира уравнение (6.1):

$$t_{1,2} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{M - M_c} \quad 6.2$$

Интегрирането на (6.2) може да се извърши само когато са известни функциите на механичната характеристика на двигателя, съпротивителния и инерционния момент от скоростта ω т.e., $M = f(\omega)$, $M_c = f(\omega)$ и $J = f(\omega)$.

В частният случай, когато $M = const$, $M_c = const$ и $J = const$, се получава:

$$t_{1,2} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M - M_c} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин}} \quad 6.3$$

Времето за пускане (ускоряване) на електродвигателя t_π от $\omega = 0$ до крайната скорост $\omega_2 = \omega_{kp}$ е:

$$t_\pi = J \frac{\omega_{kp}}{M_{дин}} \quad 6.4$$

При пускането на постояннотоковите и на асинхронните двигатели с навит ротор и пусков реостат, моментът се изменя от $M_{\pi1}$ до $M_{\pi2}$. Тогава времето с достатъчна за практиката точност може да бъде определено, като се приеме пусковият момент на електродвигателя да е постоянен и равен на средната му стойност:

$$M_{\pi\text{ср}} = \frac{M_{\pi1} + M_{\pi2}}{2} = \alpha M_h \quad 6.5$$

В зависимост от избраните граници на пусковия момент α се изменя от 1.2 до 2.

Времето за пускане t_π при $M_{\pi\text{ср}} = const$ и $M_h = const$ от скорост $\omega_1 = 0$ до $\omega_2 = \omega_c$, съответстваща на M_c , ще бъде:

$$t_\pi = \frac{J \omega_c}{M_{\pi\text{ср}} - M_c} = \frac{J \omega_c}{\alpha M_h - M_c} \quad 6.6$$

При пускане на празен ход, електродвигателят достига скорост близка до ω_0 , а времето за пускане е

$$t_\pi = \frac{J \omega_0}{M_{\pi\text{ср}}} = \frac{J \omega_0}{\alpha M_h} \quad 6.7$$

При работа на двигателя в спирачен режим, моментът на двигателя става отрицателен ($M = -M_{c\pi}$). Времето за намаляване на скоростта на двигателя от ω_2 до ω_1 се определя от равенството:

$$t_{c\pi} = \int_{\omega_2}^{\omega_1} \frac{J d\omega}{-(M_{c\pi} + M_c)} = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J d\omega}{M_{c\pi} + M_c} \quad 6.8$$

При $M = \text{const}$, $M_c = \text{const}$ и $J = \text{const}$

$$t_{\text{сп}} = J \frac{\omega_2 - \omega_1}{M + M_c} \quad 6.9$$

Когато спирането се реализира при изключен двигател, то спирането се осъществява само под действието на съпротивителния момент M_c т.е.:

$$t_{\text{сп}} = J \frac{\omega_{\text{нач}}}{M_c} \quad 6.10$$

При проектиране на електроздвижването за много производствени механизми се изисква да се осигури кратко време за ускоряване и пускане на работният орган на механизма. Това може да се постигне, чрез избиране на най-изгодното (оптимално) преводно отношение i между ъгловите скорости на двигателя ω и механизма ω_m . При зададена скорост на механизма ω_m , може да се избере двигател със скорост ω_d , която отговаря на преводно отношение $i_{\text{опт}}$, за което времето за пускане и спиране да е минимално.

Ако са известни (зададени) M , M_c , J и J_m за електродвигателя и работния механизъм, уравнението на движение, записано за вала на механизма има вида:

$$iM - M_c = (J_m + \delta J_d i^2) \frac{d\omega_m}{dt} \quad 6.11$$

където J_m е инерционен момент на механизма;

J_d – инерционен момент на двигателя;

δ – коефициент, отчитащ инерционния момент на предавката;

iM и $i^2 J_d$ – са въртящ момент на двигателя и инерционния момент на ротора му, приведени към работния вал.

Тогава вместо условието за минимално време за ускоряване, се търси условието за максимално начално ъглово ускорение на работния вал $\varepsilon = d\omega_m/dt$, съгласно уравнение (6.11):

$$\varepsilon_m = \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{iM - M_c}{J_m + \delta J_d i^2} \quad 6.12$$

Най-малко време за разворотане и спиране ще се получи при оптимално преводно отношение $i_{\text{опт}}$ т.е., при максимално ускорение. За определянето на $i_{\text{опт}}$, приравняваме $d\varepsilon_m/di = 0$ и се търси екстремума на уравнение (6.12). След диференциране и преобразуване на (6.12) се получава:

$$i_{\text{опт}} = \pm \frac{M_c}{M} + \sqrt{\left(\frac{M_c}{M}\right)^2 + \frac{J_m}{\delta J_d}} \quad 6.13$$

където „+“ е за режим пускане, а „-“ за режим спиране.

6.3. Механични преходни процеси на електроздвижването при праволинейна механична характеристика на двигателя и постоянен статичен момент

Преходните процеси в електроздвижвания с линейна механична характеристика се отнасят както за двигателите за постоянен ток с независимо възбудждане, така и за линейния участък от механичната характеристика на асинхронния трифазен двигател с навит ротор.

Механичният преходен процес се получава при условие, че захранващото напрежение за постоянноен ток е $U = const$, при постоянноен магнитен поток $\Phi = const$ и индуктивност на котвената намотка $L_a = 0$.

Статичният съпротивителен момент на вала на двигателя е постоянноен $M_c = const$, задачата на изследването е да се определят зависимостите $\omega = f_1(t)$, $I = f_2(t)$ и $M = f_3(t)$.

Като изходни уравнения за анализа се използват уравнението на движението:

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} \quad 6.14$$

и уравнението за равновесие на ЕДН в котвената верига:

$$U = E + I_a R_{a\Sigma} = k\omega + I_a R_{a\Sigma} \quad 6.15$$

При приетите условия $U = const$ и $\Phi = const$, моментът е пропорционален на тока, т.е.:

$$M = kI \text{ и } M_c = kI_c \quad 6.16$$

където I_c е стойността на тока, съответстваща на статичния съпротивителен момент M_c .

Като се отчетат моментите в (6.16) от основното уравнение на движението може да се определи токът I_a :

$$I_a = \frac{J}{k} \frac{d\omega}{dt} + I_c \quad 6.17$$

Като се замести този ток в уравнение (6.15), се получава:

$$U = k\omega + \frac{JR_{a\Sigma}}{k} \frac{d\omega}{dt} + I_c R_a \quad 6.18$$

След съответните преобразувания, описани в [9], за последното уравнение се получава изразът:

$$T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c \quad 6.19$$

където $T_M = \frac{JR_{a\Sigma}}{k^2}$ е електромеханичната константа, която характеризира електромеханичните свойства на задвижването;

$\Delta\omega_c = \frac{I_c R_a}{k}$ – статичен пад на скоростта;

$\omega_c = \omega_0 - \Delta\omega_c$ – установена стойност на скоростта при $M = M_c$.

Уравнение (6.19) представлява диференциалното уравнение за скоростта.

Аналогично на полученото диференциално уравнение за скоростта ω , могат да се получат диференциалните уравнения за тока I_a и момента M .

Ако се диференцира уравнение (6.15) при условието $U = const$ и в него се замести стойността на $d\omega/dt$ с получената от уравнение (6.17) се получава:

$$0 = k \frac{k(I_a - I_c)}{J} + R_{a\Sigma} \frac{dI_a}{dt},$$

от където следва

$$\frac{JR_{a\Sigma}}{k^2} \frac{dI_a}{dt} + I_a = I_c$$

или окончателно

$$T_M \frac{dI_a}{dt} + I_a = I_c \quad 6.20$$

като се умножи (6.20) с k , за момента на двигателя се получава

$$T_M \frac{dM}{dt} + M = M_c \quad 6.21$$

От (6.19), (6.20) и (6.21) се вижда, че решенията на тези диференциални уравнения, определят зависимостите $\omega = f_1(t)$, $I_a = f_2(t)$ и $M = f_3(t)$:

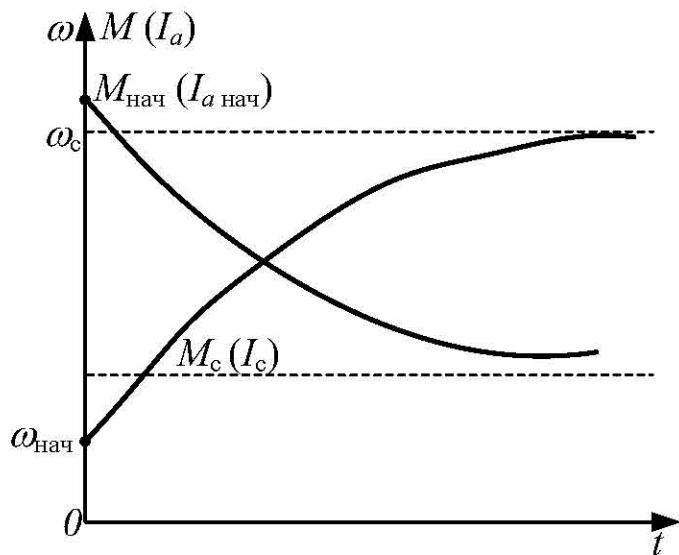
$$\begin{aligned} \omega &= \omega_c + Ae^{-\frac{t}{T_M}} \\ I_a &= I_c + Be^{-\frac{t}{T_M}} \\ M &= M_c + Ce^{-\frac{t}{T_M}} \end{aligned} \quad 6.22$$

където A, B и C са интеграционни константи, които определят началните условия. При $t = 0$, $\omega = \omega_{\text{нач}}$, $I_a = I_{a\text{ нач}}$ и $M = M_{\text{нач}}$. След като се заместят началните стойности в (5.22) се получават изразите:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + \omega_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_M}} \\ I_a &= I_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + I_{a\text{ нач}} e^{-\frac{t}{T_M}} \\ M &= M_c \left(1 - e^{-\frac{t}{T_M}}\right) + M_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_M}} \end{aligned} \quad 6.23$$

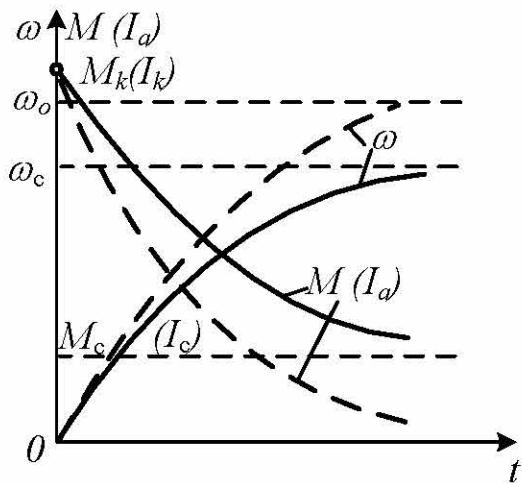
Получените стойности за A, B и C определят окончателният вид на уравненията за скоростта, тока и момента в преходния режим.

На фиг.6.1 е показан общия вид на кривите на скоростта ω , тока I_a и момента M при ускоряване на двигателя.



Фиг.6.1 Изменение на скоростта, тока и момента при ускоряване на двигателя

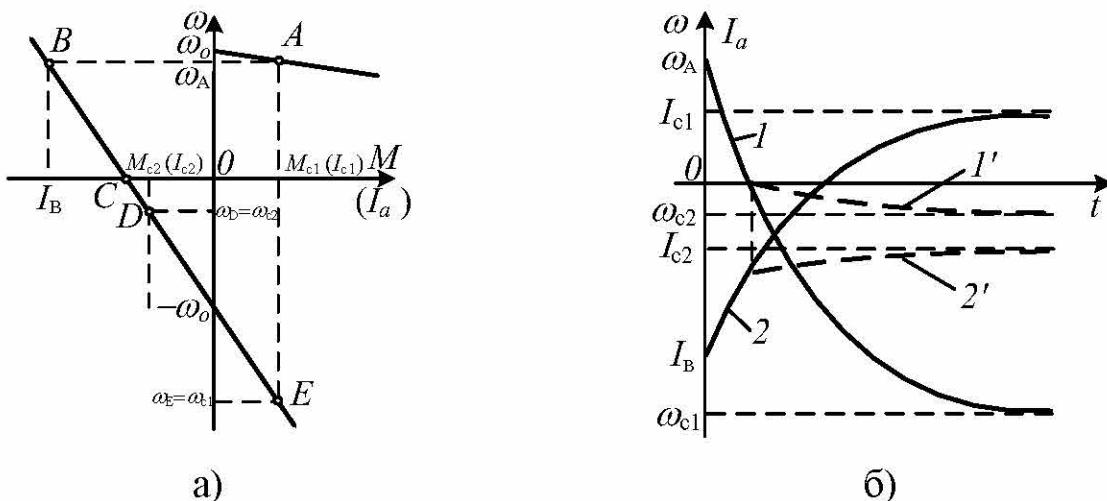
Преходните процеси за скоростта, тока и момента при пускане на празен ход и под товар са показани на фиг.6.2. С прекъснати линии са преходните характеристики при пускане на празен ход, а с плътни - при наличието на товар.



Фиг.6.2 Преходен процес при пускане на електродвигател

Режимът на противовключване е неразделна част от режима на реверсиране и затова преходните процеси се разглеждат съвместно. Преходните процеси спиране с противовключване и реверсиране се описват със същите диференциални уравнения, както при пускане, но за всеки конкретен случай се отчитат необходимите знаци пред ω_c , I_c и M_c .

На фиг.6.3 са показани механичните и преходни характеристики при реверсиране. Механичните характеристики на фиг.6.3а в участъка BC илюстрират работата на двигателя в режим на противовключване.

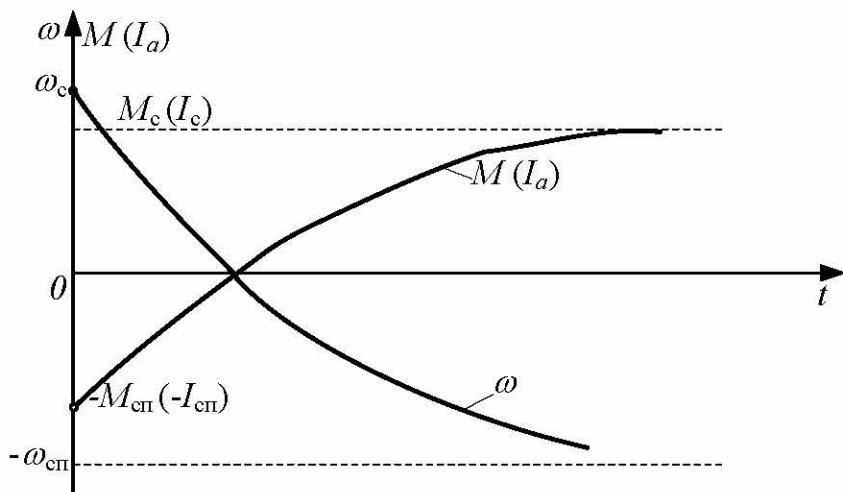


Фиг.6.3 Механични характеристики и преходен процес при реверсиране на електродвигател

При активен съпротивителен момент M_{c1} , установеното състояние настъпва в т.Е. При реактивен съпротивителен момент M_{c2} , знакът на момента се променя и новото установено състояние настъпва в т.D.

На фиг.6.3б са показани с пътни линии (крива 1 и 2) преходните характеристики на скоростта и тока при активен момент, а при реактивен момент с прекъснати линии (крива 1' и 2'). Началните стойности за скоростта и тока са ω_A и I_B .

При режим на динамично спиране, двигателят се изключва от захранващата мрежа и котвата се свързва със спирачно съпротивление. Механичните характеристики с този спирачен режим минават през началото на координатната система, което определя преминаването на преходните характеристики за скоростта, тока и момента в една точка на абсцисната ос (фиг.6.4).



Фиг.6.4 Преходен процес при динамично спиране на електродвигател

При превключване в режим на динамично спиране, началните стойности на скоростта и тока намаляват до нула и под действие на активния съпротивителен

момент изменят посоката си, но ако товара е реактивен, то електродвигателят ще спре.

6.4. Графичен и графоаналитичен методи за изчисляване на преходните процеси

Графичния и графоаналитичният методи за изчисляване на преходните процеси се използват, когато двигателят и съпротивителният момент са сложни функции на скоростта. Те се прилагат като основен метод за анализ на преходните режими за двигатели за постоянен ток с последователно и смесено възбудждане и при асинхронни двигатели с накъсо съединен ротор. Прилагат се и за нелинейни функции на съпротивителните моменти $M_c = f(\omega)$.

Точността която се постига е достатъчна за практически цели.

Най-разпространен е методът на крайните нараствания. При прилагане на този метод в уравнението за движение на електrozадвижването заменяме безкрайно малките нарастващи на скоростта $d\omega$ и времето dt , с крайни нараствания $\Delta\omega$ и Δt . Също така се приема, че в границите на крайните нараствания на скоростта $\Delta\omega$, стойностите на моментът на двигателя M и статичният момент M_c са неизменни и равни на средните им стойности.

Уравнението на движението в този случай придобива следния вид:

$$M - M_c = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad 6.24$$

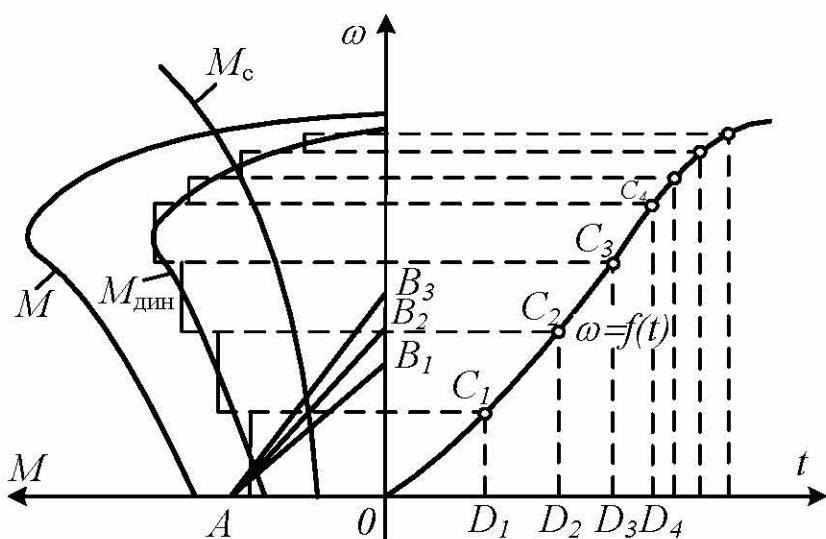
Средното значение на динамичния момент $M_{дин} = M - M_c$ за време Δt остава постоянно и тогава от уравнение (6.24) намираме пропорцията:

$$\frac{M - M_c}{J} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad 6.25$$

При този графичен метод определяме времето Δt по известни $M_{дин}$, J и $\Delta\omega$. За графичното построяване е необходимо всички величини, участващи в израз (6.25), да бъдат мащабно отразени реални величини, чрез съответните отсечки. За целта обикновено се избират мащабите на момента, скоростта и времето и от тях се намира необходимия мащаб за инерционния момент J .

На фиг.6.5 е показано графичното построяване на кривата на скоростта $\omega = f(t)$ за асинхронен двигател с накъсо съединен ротор и вентилаторен съпротивителен момент.

Зависимостта на динамичния момент $M_{дин} = M - M_c = f_3(\omega)$ се получава от графичното извеждане на механичните характеристики $M = f_1(\omega)$ и $M_c = f_2(\omega)$ построени във II-ри квадрант на чертежа.



Фиг.6.5 Изменение на скоростта при асинхронен електродвигател

Получената крива на динамичния момент се дели на участъци, отговарящи на избраните нараствания на скоростта $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n$. За всеки участък се приема $M_{дин} = const$ и площта на стъпалната крива да бъде равна на площта, заградена от действителната крива.

По абсцисната ос в този квадрант от началото на координатната система, се нанася в определен мащаб стойността на инерционния момент (отсечката $0A$). получените стойности за $M_{дин} = const$ се нанасят по ординатната ос (отсечките $0B_1, 0B_2, 0B_3$, и т.н.) и се съединяват с прости линии с т. A . В I-ви квадрант се прекарва правата $0C_1$, успоредна на AB_1 до пресичане с хоризонталната линия, ограничаваща първия участък до т. C_1 . Правата $0C_1$ представлява търсената зависимост $\omega = f(t)$ за първия участък.

По аналогичен начин се провежда построяването на втория участък. От т. C_1 до пресичане на хоризонталната линия, ограничаваща втория участък се прекарва правата C_1C_2 успоредна на AB_2 . Отсечката D_1D_2 е времето за ускоряване във втория участък. Напълно идентично е построяването за всички останали участъци.

Получената начупена линия $0C_1, C_2, \dots, C_n$ представлява нарастването на скоростта при пускане на двигателя.

От характеристиката $\omega = f_1(t)$ и механичната характеристика на двигателя $M = f(\omega)$, може да се построи преходната характеристика $M = f(t)$.

Този принцип може да се приложи и за анализ на спирачните режими на работа.

Графоаналитичният вариант на крайните нараствания, може да се приложи, като от графичната зависимост $M_{дин} = f_3(\omega)$, получена както при графичния метод, се задават последователно нараствания на скоростта $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n$, за които се определят средните стойности на динамичния момент - $M_{дин1}$,

$M_{дин 2}, \dots, M_{дин n}$. Необходимото време за всеки участък Δt_x се определя от $\Delta t_x = J \frac{\Delta \omega_x}{M_{дин x}}$. От получените данни се построява зависимостта $\omega = f(t)$.

6.5. Електромеханични преходни процеси при електроздвижването

В случаите, когато влиянието на електромагнитните процеси е голямо, при електродвигатели с малка мощност, се разглежда както влиянието на механичната, така и на електромагнитната инерция. Анализа на електромеханичните преходни процеси е значително по труден в сравнение с механичните преходни режими.

Общи изводи за характера на преходните процеси и отчитане на влиянието на отделните параметри, могат да се направят само на базата на аналитичното изследване.

Тук ще бъдат разгледани аналитично електромеханичните преходни режими на двигателя за постоянен ток с независимо възбудждане при $M_c = const$ и неизменен възбудителен ток, като се пренебрегва влиянието на редица явления – вихрови токове, самоиндуктивност на котвената намотка, реакцията на котвата и др.. Приема се, че магнитния поток на двигателя е неизменен, т.е. $\Phi = const$.

Преходните процеси на двигателя се определят от две диференциални уравнения: уравнението на движение (6.14) и уравнението за равенство на ЕДН в котвената верига:

$$U = E + I_a R_{a\Sigma} + L \frac{dI_a}{dt} \quad 6.26$$

където L е индуктивността на котвената верига;

$R_{a\Sigma}$ - сумарното активно съпротивление в котвата.

Като се разделят двете страни на уравнение (6.14) на k и се реши по отношение на тока I_a , се получава израза (6.17), където I_c е тока, съответстващ на статичния съпротивителен момент M_c .

Производната на тока по времето t е:

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{J}{k} \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad 6.27$$

При $\Phi = const$ следва $E = k\omega$ и $U = k\omega_0$, като се използват уравнения (6.17) и (6.27), то изходното уравнение за е.д.н (6.26) се представя в следния вид:

$$k\omega_0 = k\omega + \frac{JR_{a\Sigma}}{k} \frac{d\omega}{dt} + I_c R_{a\Sigma} + \frac{JL}{k} \frac{d^2\omega}{dt^2} \quad 6.28$$

След разделяне на последното уравнение на k и преобразуване се получава диференциалното уравнение за скоростта.

$$T_E T_M \frac{d^2 \omega}{dt^2} + T_M \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_c \quad 6.29$$

където $T_E = \frac{L}{R_{a\Sigma}}$ е електромагнитната времеконстанта на котвената верига;

$T_M = \frac{JR_{a\Sigma}}{k^2}$ е електромеханичната константа;

$\omega_c = \omega_0 - \frac{I_c R_{a\Sigma}}{k}$ – установената скорост, която съответства на момента M_c .

За да се намери диференциалното уравнение за котвения ток е необходимо да се диференцира уравнението (6.26) по времето t :

$$0 = k \frac{d\omega}{dt} + R_{a\Sigma} \frac{dI_a}{dt} + L \frac{d^2 I_a}{dt^2} \quad 6.30$$

Производната на скоростта може да се определи от уравнение (6.17)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{J}{k} (I_a - I_c) \quad 6.31$$

от уравнения (6.30) и (6.31) се получава:

$$L \frac{d^2 I_a}{dt^2} + R_{a\Sigma} \frac{dI_a}{dt} + \frac{k^2}{J} (I_a - I_c) = 0 \quad 6.32$$

като се умножи последното уравнение с J/k^2 и се преобразува, се получава диференциалното уравнение за котвения ток:

$$T_E T_M \frac{d^2 I_a}{dt^2} + T_M \frac{dI_a}{dt} + I_a = I_c \quad 6.33$$

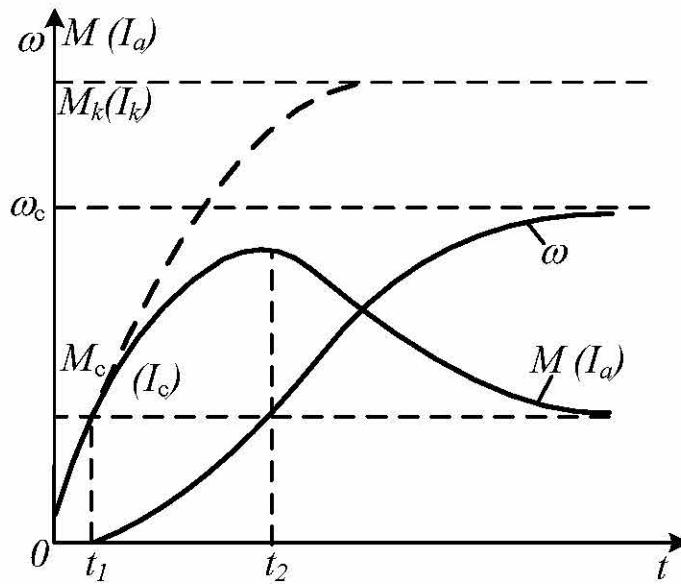
По аналогичен начин се намира диференциалното уравнение за двигателният момент:

$$T_E T_M \frac{d^2 M}{dt^2} + T_M \frac{dM}{dt} + M = M_c \quad 6.34$$

Уравнения (6.29), (6.33) и (6.34) са съвършено аналитични. С решаването на тези диференциални уравнения при съответните начални условия, се получават преходни характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ и $I_a = f(t)$. Графичната интерпретация за едно решение на уравненията при пускане на двигателя за постоянен ток с независимо възбуждане при $M_c = const$ е показано на фиг.6.6.

Изменението на величините ω , I_a и M във времето може да се раздели на три участъка.

В първия участък $0t_1$, двигателят остава неподвижен, докато M , респективно I_a , стане равен на статичния момент M_c (I_c). През този период преходния режим има чисто електромагнитен характер и се определя само от времеконстантата T_E .



Фиг. 6.6 Електромеханичен преходен процес при $M_c = \text{const}$ и линейна механическа характеристика на двигател за постоянен ток с независимо възбудждане

През втория период, който започва, след като двигателният момент стане по-голям от статичния, двигателят започва да се развърта до времето t_2 . Изменението на величините става под действие на електромагнитната и механичната инерция, т.е. определя се едновременно от времеконстантите T_E и T_M . След t_2 влияние оказва основно механичната инерция, определена от времеконстантата T_M .

Затихването на електромагнитния преходен процес за времето $0t_2$ показва, че от този момент нататък преходният процес може да се счита като механичен.

Глава 7

ИЗБОР НА МОЩНОСТТА НА ДВИГАТЕЛЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНАТА СИСТЕМА

7.1. Съображения при избора на мощността на електродвигателите

Правилният избор на мощността на електродвигателите е от голямо значение за производителността на работния механизъм, за експлоатационните разходи, сигурността и капиталовложенията. Използването на двигател с по-малка мощност от необходимата, води до намаляване на производителността на механизма, преждевременно износване и възникване на аварии. При изборът на двигател със завишена мощност нарастват капиталовложенията и се влошават експлоатационните му показатели – по-нисък к.п.д., а при асинхронните двигатели и по-нисък фактор на мощността.

Правилно избраният по мощност двигател трябва да осигурява нормален режим на механизма, без да прегрява над допустимата температура и да понася кратковременни претоварвания без да предизвикват забележимо прегряване.

При избора на мощността на двигателя се отчитат, както натоварванията в установлен режим на работа, така и тези възникнали при переходните процеси. Поради това е необходимо да знаем изменението на натоварването във функция от времето. Зависимостите на момента, мощността и тока на двигателя от времето ($M_T(t)$, $P_T(t)$ и $I_T(t)$), се наричат *товарни времедиаграми* на електродвигателя. Товарните времедиаграми трябва да се построят, както за установлените режими на работа, така и за переходните режими. Избраният в съответствие с товарните диаграми електродвигател, трябва да се използва напълно, без да се прегрява над допустимата температура и без да се претоварва над допустимите стойности. Освен това той трябва да осигурява

нормалната работа на механизма при кратковременни натоварвания и необходимия пусков момент.

Проверка на електродвигателя по претоварване се извършва с определяне на максималния момент от зависимостта:

$$M_{max} \leq \lambda_h M_n \quad 7.1$$

където λ_h е претоварващата способност на електродвигателят;

M_n – номиналният момент на двигателя.

Стойностите на коефициента на претоварване по мощност за асинхронните двигатели е $\lambda_h = \frac{M_k}{M_n} = (1.7 \div 2.7)$, а за тези на постоянен ток в границите $\lambda_h = \frac{M_{max}}{M_n} = (1.6 \div 3.5)$.

Нагряването на двигателя става за сметка на загуби, възникващи в него при преобразуването на електрическата енергия в механична. Допустимата температура на нагряване на двигателя се определя от топлоустойчивостта на използваните изолационни материали за намотките на двигателя.

Използваните в електрическите машини изолационни материали (в зависимост от допустимата температура на загряване) се разделят на седем класа. Те са: Y до 90°C, A-105°C, E-120°C, B-130°C, F-155°C, H-180°C и C>180°C. При спазване на условието за прегряване се изисква, трайността на изолационните материали за електродвигателите, да не бъде по малка от 15÷20 години при нормална експлоатация.

Съгласно стандарта се нормира не допустимата температура, а допустимото прегряване τ на двигателя над температурата на околната среда, която се приема 35°C.

$$\tau = \theta_{dB} - \theta_{ok} = \theta_{dB} - 35^\circ\text{C} \quad 7.2$$

където θ_{dB} е температурата на двигателя;

θ_{ok} – температура на околната среда.

Ако температурата на околната среда се различава от 35°C, то и допустимото прегряване се различава от стандартното.

7.2. Загряване и охлажддане на електродвигателите

При работа на двигателя, вследствие на загубите в него се отделя топлина. Една част от тази топлина повишава температурата на двигателя, а друга се отделя в околната среда.

При различните режими на работа отделеното количество на топлината е различно. Така например, при празен ход, топлината се предава от по-силно нагрятата стомана към по-малко нагретите намотки, а при натоварване на двигателя, посоката на топлинния поток е обратна. Точното изследване на

топлинните процеси е трудно и затова с цел да се опрости изследването, двигателят се разглежда като еднородно тяло с еднаква температура във всичките му точки. Приема се, че отдаваната в околната среда топлина е пропорционална на разликата в температурите на двигателя и на околната среда.

Ако двигателят работи с постоянна мощност $P(W)$ и има загуби $\Delta P(W)$, количеството топлина, което се отделя в него за време dt ще бъде:

$$\begin{aligned} Qdt &= \Delta Pdt, (\text{J}) \\ Qdt &= 0.2388\Delta Pdt, (\text{kal}) \end{aligned} \quad 7.3$$

където Q е количеството топлина, което се отделя за единица време в kal/s или J/s .

Тогава за електродвигателя можем да запишем следното диференциално уравнение на топлинния баланс за времето dt .

$$Qdt = Cdt + Atdt \quad 7.4$$

където Q е количеството топлина, което се отделя за единица време, J/s ;

C – топлинен капацитет на електродвигателя, т.е. количеството топлина, което е необходимо за повишаване на температурата на двигателя с 1°C , $\text{J}/^\circ\text{C}$;

A – коефициент на топлоотдаване, т.е. количеството топлина, което отдава двигателят в околната среда при разлика в температурите 1°C , $\text{J/s. }^\circ\text{C}$;

τ – превишаване на температурата на двигателя над температурата на околната среда (прегряване), $^\circ\text{C}$.

Част от топлината Cdt , се изразходва за прегряване на двигателя, а останалата част $Atdt$ – се отделя от двигателя и отдава в околната среда.

За намиране на зависимостта $\tau = f(t)$ е необходимо да се разгледат променливите в уравнение (7.4).

$$dt = \frac{C}{Q - At} d\tau \quad 7.5$$

след интегриране се получава:

$$t = -\frac{C}{A} \ln(Q - At) + D \quad 7.6$$

В общиия случай при начални условия $t = 0$ и $\tau = \tau_{\text{нач}}$ се определя интеграционната константа:

$$D = \frac{C}{A} \ln(Q - A\tau_{\text{нач}}) \quad 7.7$$

Като се замести определената стойност за D в уравнение (7.6), се получава:

$$t = -\frac{C}{A} [\ln(Q - At) - \ln(Q - A\tau_{\text{нач}})] = -\frac{C}{A} \ln \frac{Q - At}{Q - A\tau_{\text{нач}}} \quad 7.8$$

Отношението $C/A = T_3$ се нарича времеконстанта на загряването.

Решението на уравнението (7.8), относно τ придобива вида:

$$\tau = \frac{Q}{A} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_3}} \quad 7.9$$

уравнението (7.9) определя изменението на прегряването във времето. При $t = 0$ прегряването е $\tau = \tau_{\text{нач}}$, а при $t = \infty$ превишаването на температурата достига установената си стойност:

$$\tau_y = \frac{Q}{A} \quad 7.10$$

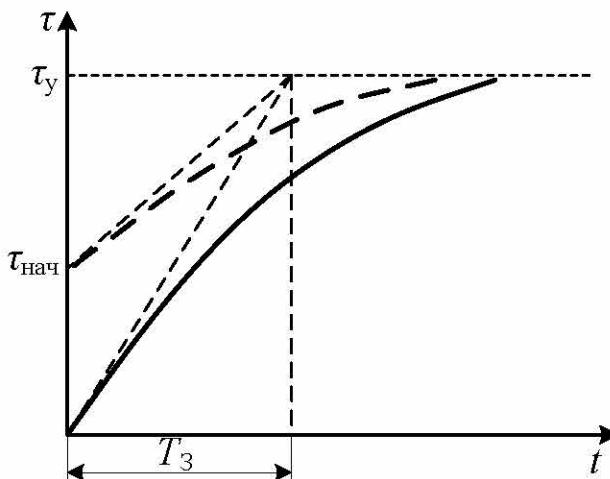
като се използва полученото определение за установената температура от (7.10) се получава окончателния вид на зависимостта $\tau = f(t)$:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_3}} \quad 7.11$$

Ако при включване на двигателя температурата е равна на температурата на околната среда, т.е. $\tau_{\text{нач}} = 0$, то уравнението за прегряването получава вида:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T_3}} \right) \quad 7.12$$

На фиг. 7.1 са показани преходните характеристики за загряване на двигателя при $\tau_{\text{нач}} \neq 0$ (прекъсната линия) и $\tau_{\text{нач}} = 0$ (плътната линия).



Фиг. 7.1 Преходен процес при загряване на електродвигател

Както се вижда, характеристиките на прегряване се изменят по експоненциален закон и достигат до установеното значение при τ_y след време $t = \infty$, независимо от началната стойност на прегряването $\tau_{\text{нач}}$. Практически двигателят след време $t = (3 \div 4)T_3$, от момента на включване почти достига установената температура τ_y на прегряване, като разликата от τ_y не е повече от 2÷5%.

Времеконстантата T_3 представлява времето, за което двигателят се нагрява до установената температура на прегряване τ_y , ако не се отдава топлина в околната среда. Тя характеризира бързината на нарастване на температурата на

прегряване в началния момент на загряването, т.е. температурата на прегряване при липса на топлоподаване $A = 0$ се изменя по линеен закон.

Ако в (7.12) заместим текущото време $t = T_3$, се получава:

$$\tau = \tau_y(1 - e^{-1}) = 0.632\tau_y \quad 7.13$$

Това позволява да се определи графично стойността на времеконстантата T_3 , от характеристиката $\tau = f(t)$, като отчетем времето за което прегряването е достигнало $\tau = 0.632\tau_y$.

Времеконстантата на загряването T_3 може да се определи, чрез прекарване на тангента към характеристиката $\tau = f(t)$ в началото или към произволна точка (фиг. 7.1).

При изключване на двигателя от мрежата се извършва процес на охлажддане, от двигателя не се отделят загуби на енергия, т.е. $Qdt = 0$ и уравнение (7.4) има следния вид:

$$0 = Cdt + A_0\tau dt \quad 7.14$$

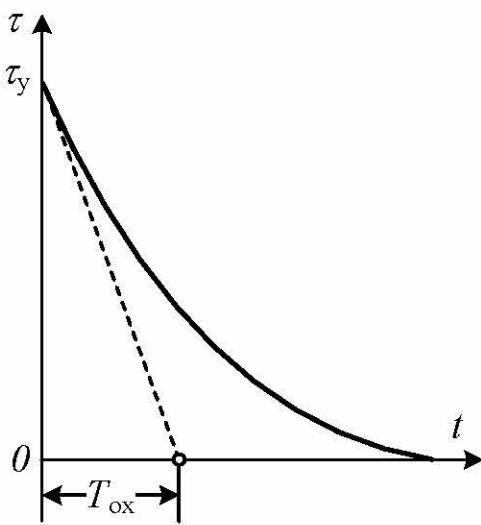
където A_0 е коефициентът на топлоотдаване на двигателя при охлажддане.

След интегриране на уравнение (7.14) при начални условия $t = 0$ и $\tau_0 = \tau_y$, се получава уравнението за охлажддане на двигателя:

$$\tau = \tau_y e^{-\frac{t}{T_{ox}}} \quad 7.15$$

където T_{ox} е времеконстантата на охлажддане.

Графичната интерпретация на уравнение (7.15) е процесът на охлажддане, който протича по представената на фиг. 7.2 експонента.



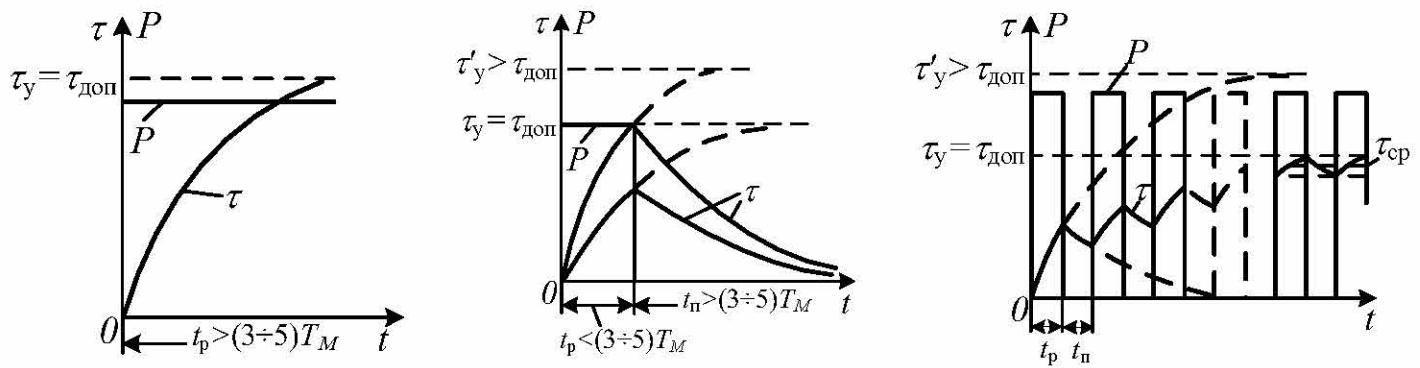
Фиг. 7.2 Преходен процес при охлажддане на електродвигател

При двигатели със самовентилация, топлоотдаването A_0 при охлажддане ще бъде по-малко, отколкото при загряване A . Това определя по-голямата стойност на времеконстантата $T_{ox} = (2 \div 3)T_3$.

7.3. Режими на работа на електродвигателите от гледна точка на загряване

В зависимост от продължителността на работа и характера на процесите на загряване и охлаждане на електродвигателя са установени три основни режима на работа: *продължителен, кратковременен и повторно-кратковременен*.

Продължителен режим на работа е режимът, продължителността на който е толкова голяма, че температурата на двигателя достига установената стойност (фиг.7.3).



Фиг.7.3 Режими на работа на електродвигателя от гледна точка на загряването

Продължителният режим може да бъде с постоянен товар или с променящо се натоварване по време на работа. На практика за продължителен режим се приема този, при който времето на работа $t_p = (3 \div 5)T_M$.

За да не прегрява електродвигателят с определено натоварване P , фиг.7.3а, в продължителен режим на работа, трябва $\tau_y = \tau_{\text{доп}}$. Ако $\tau_y < \tau_{\text{доп}}$, електродвигателят не се използва пълноценно по загряване.

При *кратковременен режим* на работа, продължителността на работния период $t_p < (3 \div 5)T_M$ и не е достатъчна за достигане на τ_y (фиг.7.3б), а през времето на паузата двигателят се охлажда до температура на околната среда ($\tau = 0$). За кратковременния режим на работа са въведени стандартни продължителности на включване 15', 30', 60' и 90' (минути).

Повторно-кратковременен режим на работа е характерен с това, че периодите на работа t_p се редуват с периодите на паузите t_n , когато двигателят не е включен към захранващата мрежа. През периода на работа двигателят не успява да се загреет до τ_y и през паузите не достига температурата на околната среда. Редуват се цикли с продължителност $t_{\text{ц}} = t_p + t_n$, като прегряването след известно време се установява в постоянни граници – фиг.7.3в.

Повторно-кратковременният режим се характеризира с относителната продължителност на включването

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_p + t_n} = \frac{t_p}{t_n} \quad \text{или} \quad \text{ПВ\%} = \frac{t_p}{t_n} 100\% \quad 7.16$$

Произвеждат се електродвигатели със стандартни стойности на продължителността на включване ПВ=15%; 25%; 40% и 60%. Продължителността на един цикъл t_n не трябва да надвишава 10min.

Номиналната мощност при повторно-кратковременен режим на работа на електродвигателя е максималната мощност, която той може да развива по предписания цикъл ПВ%, неограничено дълго време, без да се прегрява над допустимата температура.

Всеки двигател може да работи в изброените режими, но условията на нагряването на двигателя за отделните режими на работа са различни. Затова се изработват електродвигатели, специално предназначени за съответния режим на работа - електродвигатели за продължителен, кратковременен и повторно-кратковременен режим на работа.

7.4. Избор на мощността на електродвигателите при продължителен, кратковременен и повторно-кратковременен режим на работа

Изборът на мощността на електродвигателят при продължително, постоянно и малко изменящо се натоварване е най-лесен. За избора на двигател в този случай е необходимо да е известна мощността на вала на работния механизъм P_c с отчитане на загубите в предавките. Тази мощност може да се определи теоретично от съответните технологични зависимости или по експериментален начин. След като се определи статичната мощност на механизма, от каталога се избира електродвигател номинална мощност P_h , равна или по-голяма от статичната.

$$P_h \geq \frac{P_c}{\eta} \quad 7.17$$

където η е к.п.д. на механизма от предавката.

В случаите, когато статичната мощност P_c се променя незначително, мощността на двигателя P_h се определя от средната статична мощност P_{cp} , получена от кривата на товара, т.е. $P_h \geq \frac{P_{cp}}{\eta}$

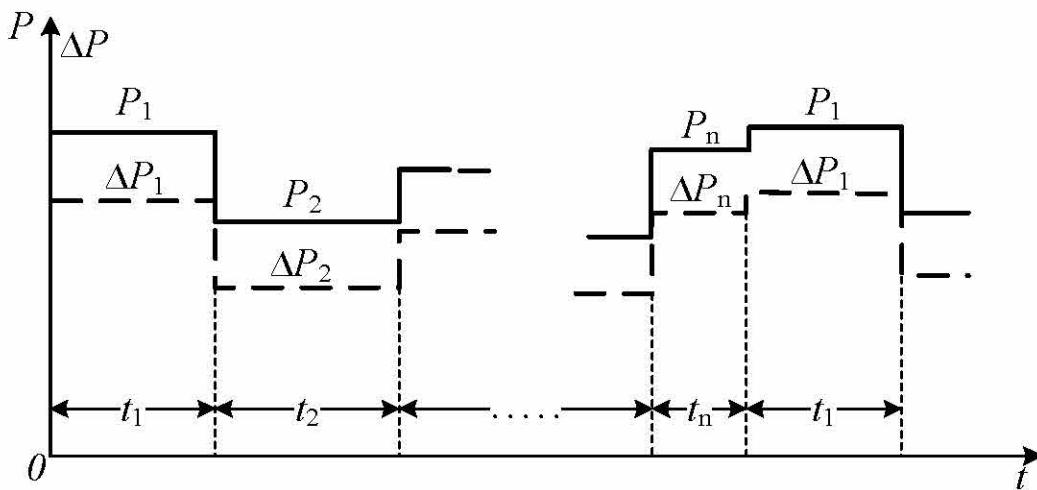
Голяма част от производствените механизми работят с продължително променливо натоварване, като това променя и характера на загряването, което прави избора на двигател по-сложен.

Ако се направи избор на двигател за по-голямо натоварване, ще доведе до неизползване на двигателя. Изборът на двигател с по-малка или средна

мощност довежда до претоварване на двигателя. В този случай изборът на двигател може да се извърши най-точно, като се определи аналитично кривата на загряването му, което на практика изисква множество изчисления. За това при проверка на избраният двигател по загряване, се използва *методът на средните загуби и методът на еквивалентните величини*.

Методът на средните загуби е достатъчно точен и може да се използва при избора на двигател с променливо натоварване.

На фиг. 7.4 е показана товарната диаграма $P_t = f(t)$ и цикличен график с променливо натоварване по какъвто най-често работят двигателите и съпротивителния график на загубите $\Delta P = f(t)$.



Фиг. 7.4 Товарова диаграма $P_t = f(t)$ и график на загубите $\Delta P = f(t)$

След достатъчен брой цикли, двигателят достига установеното си топлинно състояние, при което температурата в началото на цикъла е равна с тази в края на цикъла, т.е. $\tau_h = \tau_{kp}$.

От графика на загубите се определят средните загуби:

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad 7.18$$

където $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ са загубите при променливо натоварване в цикъла;

t_1, t_2, \dots, t_n времето на работа с постоянни загуби.

Уравнение (7.18) показва, че продължителният режим с променливо натоварване, може да се замени с еквивалентен продължителен режим с постоянно натоварване.

С помощта на метода на средните загуби двигателят трябва така да се избере така, че номиналните му загуби да бъдат равни или по-големи от средните загуби за режима с променливо натоварване, т.е. $\Delta P_h \geq \Delta P_{cp}$.

При този метод не винаги се разполага с необходимите данни за определяне на загубите ΔP и поради това се използва в случаите, когато се налага да се направи точна проверка на електродвигателя по загряване.

Методът на еквивалентните величини е по-неточен, но е по-удобен за приложение. Той се среща в три варианта - метод на еквивалентния ток, еквивалентния момент и еквивалентната мощност.

Методът на еквивалентния ток се основава на замяна на реалния изменящ се по големина ток в двигателя с еквивалентен неизменен ток I_e , който създава същите загуби в електродвигателя както реалният.

Методът може да се използва в случаите, когато е известна товарната диаграма $I(t)$ на двигателя.

Еквивалентният ток може да се определи от следният израз:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad 7.19$$

В този израз числителят е сумата от произведенията на квадратите на тока и времето за отделните периоди на работа t_n , по графиката на товара, а знаменателят е времето за целия цикъл.

След определяне на еквивалентния ток I_e той се сравнява с номиналния ток I_h на предварително избрания от каталога двигател, като трябва да бъде изпълнено неравенството:

$$I_h \geq I_e \quad 7.20$$

Предварително избраният двигател може да се счита за подходящ, ако се изпълнят и условието за допустимо кратковременно претоварване.

$$I_h \geq \frac{I_{max}}{\lambda_I} \quad \text{или} \quad M_h \geq \frac{M_{max}}{\lambda_M} \quad 7.21$$

Уравнението за еквивалентния ток (7.19) е валидно само когато постоянните загуби през целия работен цикъл остават постоянни. Ако зависимостта $I = f(t)$ не е стъпална, а има плавен характер, се използва зависимостта:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{t_{\Pi}} \int_0^{t_{\Pi}} I^2(t) dt} \quad 7.22$$

където $t_{\Pi} = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ е времето на цикъла

В този случай плаващата крива $I(t)$ се представя, като съставена от праволинейни участъци.

Ако са известни товарните диаграми за момента и мощността, т.е. зависимостите $M = f(t)$ или $P = f(t)$ се използват методите на еквивалентния момент или на еквивалентната мощност.

Методът на еквивалентният момент M_e може да се използва, когато при изменение на товара на електродвигателя, моментът на двигателя остава

пропорционален на тока ($M = kI$). Тогава от уравнение (7.19) се получава израза за еквивалентния момент:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad 7.23$$

Ако скоростта на двигателя остава постоянна или се изменя незначително, между мощността и момента съществува пропорционална зависимост $P = \omega M$. В този случай от уравнение (7.23) се получава формулата за еквивалентната мощност:

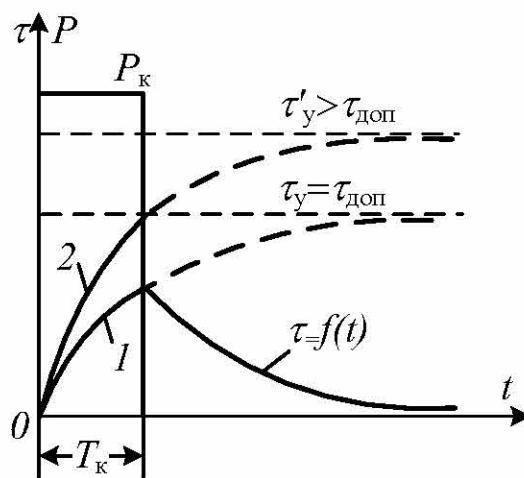
$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad 7.24$$

По-точен от методите на еквивалентните величини е методът на еквивалентния ток. Този метод в много случаи се ползва при избор на мощността на двигателя. Методът на еквивалентния ток не може да се използва, когато се променят постоянните загуби, т.е. загуби в стоманата и от триене, т.к. при определяне на еквивалентния ток I_e те бяха приети за постоянни. Също така той е неприложим, когато активното съпротивление на намотките се изменя по време на работа (при асинхронните двигатели с дълбоки канали или двойна кафезна намотка).

Същите ограничения са валидни и при използване на метода на еквивалентния момент. Този метод е неприложим и когато магнитния поток е променлив, примерно електродвигател за постоянен ток с последователно или смесено възбудждане или пускане и спиране на асинхронен електродвигател с накъсо съединен ротор.

Методът на еквивалентната мощност е най-простият метод при избора на мощността на двигател, но той може да се използва в ограничени случаи – при работа на двигателя с постоянна скорост.

Кратковремният режим на работа се характеризира с това, че през време на работния период двигателят не може да се загрее до установената температура, а през време на паузата се охлажда до температурата на околната среда. Обикновено двигатели за кратковременен режим на работа не се произвеждат. Поради това, ако се избира двигател, изчислен за продължителен режим на работа по кратковременната мощност P_k , то прегряването на двигателя в края на работния период ще бъде по-малко от допустимото. Това се вижда на представената опростена диаграма на фиг. 7.5 (крива 1).



Фиг. 7.5 Кратковременен режим - товарна диаграма и криви на загряването

Следователно, когато в кратковременен режим се използват двигатели, предназначени за работа в продължителен режим, това може да стане, ако се избере номинална мощност $P_{\text{н}} < P_{\text{k}}$. При работа на този двигател с мощност P_{k} в него ще се отделят по-големи топлинни загуби от номиналните, които определят по-голяма установена стойност на прегряването $\tau'_y > \tau_{\text{доп}}$, крива 2 на фиг. 7.5.

Отношението на загубите в двигателя, които осигуряват еднакво прегряване в кратковременен режим със зададена продължителност и в продължителен режим на работа, се нарича *кофициент на термично претоварване* - ρ_{T} .

$$\rho_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{k}}}{Q_{\text{н}}} \quad 7.25$$

където Q_{k} са допустимите загуби при кратковременно претоварване;

$Q_{\text{н}}$ – номинални (допустими) загуби при продължителен режим.

При продължителен режим с номинално натоварване, установената стойност на прегряването е:

$$\tau_y = \tau_{\text{доп}} = \frac{Q_{\text{н}}}{A} \quad 7.26$$

В кратковременен режим същата температура трябва да се достигне за време $\tau_{\text{доп}}$, т.е.

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{Q_{\text{k}}}{A} \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{k}}}{T_3}}\right) = \tau'_y \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{k}}}{T_3}}\right) \quad 7.27$$

С помощта на изразите (7.25) и (7.27) се намира коефициента на температурно претоварване:

$$\rho_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{k}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{\tau'_y}{\tau_{\text{доп}}} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{\text{k}}}{T_3}}} \quad 7.28$$

От равенство (7.28) може да се получи връзката между времето за кратковременна работа и коефициента на термично претоварване:

$$t_k = T_3 \ln \frac{\rho_t}{\rho_t - 1} \quad 7.29$$

където ρ_t е коефициента на термично претоварване.

За определяне на допустимото претоварване по мощност на двигателя, трябва да се намери *коefficienta на механично претоварване* - ρ_m :

$$\rho_m = \frac{P_k}{P_h} \quad 7.30$$

където P_k е допустимата мощност при кратковременно прегряване;

P_h – допустимата мощност при продължително прегряване.

Връзката между коефициента на механичното и термичното натоварване е:

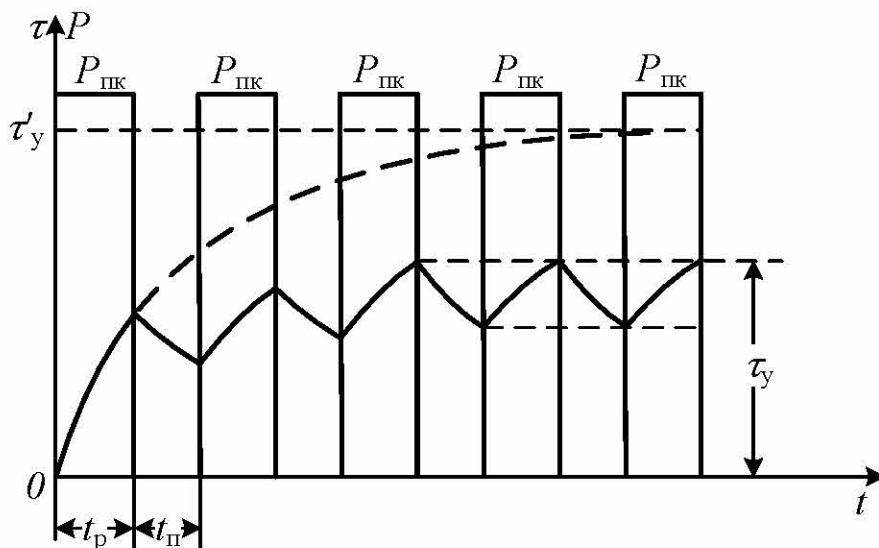
$$\rho_m = \sqrt{\rho_t} \quad 7.31$$

От представените уравнения (7.30) и (7.31), може да се намери претоварващата мощност P_k , ако двигателят за продължителен режим се използва в кратковременен режим на работа, т.е.

$$P_k = \rho_m P_h \quad 7.32$$

По тази мощност P_k се избира двигателят, което означава, че мощността на двигателя е по-малка от начално избраната $P_h = P_k / \rho_m$.

При повторно-кратковременният режим на работа нагряването на двигателя по време на работа се изменя с експоненциални участъци и достига установени колебания със сравнително малки амплитуди, както е показано на фиг. 7.6.



Фиг. 7.6 Повторно-кратковременен режим – товарна диаграма и крива на нагряването

Поради охлажддане на намотките през паузите t_n двигателят не достига температурата t_y , която отговаря на продължителния режим при мощност P_{pk} .

За това при работа в повторно-кратковременен режим на двигател изчислен за продължителен режим на работа по мощността $P_{\text{пк}}$, няма да бъде използван напълно. Следователно, когато в повторно-кратковременен режим се използват двигатели, предназначени за работа в продължителен режим се избира мощност $P_{\text{H}} < P_{\text{пк}}$.

Възможното претоварване на двигателя се определя от коефициента на термично и механично претоварване.

$$\rho_{\text{T}} = \frac{Q_{\text{пк}}}{Q_{\text{H}}} \quad \text{и} \quad \rho_{\text{M}} = \frac{P_{\text{пк}}}{P_{\text{H}}} \quad 7.33$$

където $Q_{\text{пк}}$ и $P_{\text{пк}}$ са топлинните загуби и мощност при повторно-кратковременен режим на работа.

Двигателят с мощност $P_{\text{H}} = \frac{P_{\text{пк}}}{\rho_{\text{M}}} < P_{\text{пк}}$ трябва да има допустима стойност на прегряването $\tau_y = \tau_{\text{доп}}$.

При повторно-кратковременен режим обаче не е целесъобразно да се използват двигатели, изчислени за продължителен режим на работа, т.к. условията на работа за двата режима в топлинно отношение са различни. Поради това е препоръчително да се използват двигатели предназначени за работа в повторно-кратковременен режим.

В каталожните данни на двигателите за повторно-кратковременен режим е дадена номиналната мощност P_{H} на вала за отделните продължителности на включване – ПВ% = 15; 25; 40 и 60% ($\gamma = 0.15; 0.25; 0.4$ и 0.6). Основен режим при кратковременната работа за двигателите е ПВ5=25% ($\gamma = 0.25$). Когато е дадена само една каталожна стойност за мощността P_{H} , то тя е валидна за продължителност на включване $\gamma = 0.25$. Когато продължителността на повторното включване γ определена от товарната диаграма се различава от стандартната стойност, двигателят се избира по най-близката стандартна продължителност на включване и трябва да се преизчисли неговата мощност P_x за действителното γ_x . За да се извърши преизчисляване на мощността P_x за продължителност на включване γ_x към стандартната продължителност на включване се използват една от следните формули, най-близка до стойността на γ_x .

$$P_{15} = P_x \sqrt{\frac{\gamma_x}{0.15}} ; P_{25} = P_x \sqrt{\frac{\gamma_x}{0.25}} ; P_{40} = P_x \sqrt{\frac{\gamma_x}{0.4}} \quad \text{и} \quad P_{60} = P_x \sqrt{\frac{\gamma_x}{0.6}} \quad 7.34$$

Глава 8

ТОВАРНИ ДИАГРАМИ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ СИСТЕМИ

8.1. Значение на товарните диаграми за избиране на мощността на двигателя

Товарната диаграма графично изобразява закона на изменение на момента, мощността или тока на двигателя във времето, т.е. $M, P, I = f(t)$. Товарната диаграма позволява не само правилното определяне мощността на електродвигателя и претоварващата му способност, но и установяване на границата на регулиране на скоростта, условията за пускането, правилният избор на защитата и др.. Товарната диаграма на електrozадвижването обикновено се различава от тази на работния механизъм. Товарната диаграма на работния механизъм представлява зависимостта на статичния съпротивителен момент на вала му от времето, т.е. $M_c = f(t)$. При установлен режим на работа, когато ускорението $d\omega/dt = 0$ и $M = M_c$, товарната диаграма на работния механизъм съвпада с тази на електrozадвижването, като се пренебрегват загубите в предавките или когато всички моменти са приведат към вала на двигателя.

Товарната диаграма отразява характерните особености на електродвигателя и на работния механизъм. Тя зависи от инерционните моменти на отделните елементи на задвижването, които влияят по определен начин върху работата на двигателя. Ако механичната характеристика на двигателя има наклон, то следствие на инерционните маси, товарните диаграми на двигателя ще имат по-изгладен характер отколкото тези на работния механизъм. Инерционните маси облекчават работата на електродвигателя при върхови натоварвания, като отдават част от запасената кинетична енергия. Съгласно товарната диаграма на работния механизъм при разтоварване

двигателят ще развива по-голям момент от необходимия, защото част от енергията се е натрупала в инерционните маси при ускоряването им. Това доказва, че товарната диаграма на електроздвижването е винаги по-плавна, в сравнение с диаграмата на работния механизъм.

8.2. Построяване на товарните диаграми

Товарните диаграми могат да се построят, като се вземат под внимание особеностите от съвместната работа на електродвигателите и работните механизми.

Товарната диаграма на работния механизъм се построява или въз основа на производствения процес, продължителността на работния период и празния ход, или чрез момента или мощността на статичния товар.

Товарните диаграми на работните механизми са функции в различна степен на скоростта ω , изминатия път α (ъгъл) или времето t .

$$M_c = f(\omega), M_c = f(\alpha) \text{ или } M_c = f(t).$$

При работа на механизма статичният момент се мени непрекъснато. По време на преходния процес двигателят трябва да преодолява не само статичния, но и динамичния моменти. Затова средният квадратичен момент на двигателя винаги е по-голям от средния статичен момент. При предварителния избор на двигателя номиналният му момент трябва да бъде по-голям от средния статичен момент, т.e $M_h = (1.1 \div 1.3)M_{c\text{ср}}$ за един цикъл на работа.

Товарните диаграми на електроздвижването могат да се построят чрез решаване на основното уравнение на движението - $M = M_{дин} + M_c$.

За да се построи товарната диаграма $M = f(t)$, трябва предварително да се построят зависимостите $M_c = f(t)$ и $M_{дин} = f(t)$. След проверка по загряване и претоварваща способност на електродвигателя, ако той не удовлетворява тези условия, се избира друг и изчисленията се повтарят. За изчисляване на динамичния момент обаче са необходими номиналните данни на електродвигателя и инерционния му момент.

За построяване на товарната диаграма на електроздвижването се изхожда от товарната диаграма на работния механизъм и се избира предварително ориентировъчната мощност на електродвигателя.

След построяването на товарната диаграма на електроздвижването избраният електродвигател се проверява по загряване и претоварваща способност. Ако избраният двигател не удовлетворява тези условия, тази процедура се повтаря, до окончателното избиране на необходимия електродвигател за електроздвижването.

ИЗПОЛЗВАНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ

1. Dubey G., Fundamentals of electrical drives, Alpha Science International Ltd., 2001.
2. Lander C., Power Electronics. Mc Craw H. II Book Company, London, 1993.
3. Michael T. DiRenzo, Switched reluctance motor control – basic operation and example using the TMS320F240, Texas Instruments Incorporated, 2000. (<http://www.ti.com/lit/an/spra420a/spra420a.pdf>)
4. Nisit K. and K. Prasanta, Electric drives, New Delhi, 2006.
5. Андреев В. П., Ю. А. Сабинин, Основы электропривода (издания второе, переработанное), Ленинград, Государственное энергетическое издательство, 1963.
6. Дементьев Ю.Н., А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев, Электрический привод, Томского политехнического университета, 2010.
7. Добровски И. А., Общ курс по електроздвижване, София, Техника, 1972.
8. Ильинский Н.Ф., Основы электропривода, Москва, МЭИ, 2000.
9. Йорданов Д. Ст., Основи на електроздвижването, София, Техника, 1989.
10. Ключев В., Теория на електроздвижването. София, техника, 1989.
11. Костов И. Й., Електроздвижвания с постояннотокови, асинхронни и синхронни двигатели. Пловдив, УЧИ, 2016.
12. Кузманов Е. К., Управление на електромеханични системи (курс лекции-записки), Русе, Печатна база при Русенски университет, 2003.
13. Минчев Д. С., Основи на електроздвижването, София, Техника, 1973.
14. Минчева М. Ст., Електромеханични устройства (Електрически машини и апарати). София, Авангард Прима, 2008.
15. Михов М. Р., Управление на електромеханични системи – I част, Технически университет-София, 2006.
16. Онищенко Г.Б., Электрический привод, Москва, Академия, 2006.
17. Романов А.В., Электрический привод, Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2006.
18. Чиликин М. и др. Основы автоматизированного электропривода. Москва, Энергия, 1974.
19. Яков В. И., В. В. Стефанов, Електромеханични устройства и системи, Русе, Русенски университет „Ангел Кънчев“, 2013.

СЪДЪРЖАНИЕ:

Глава 1 МЕХАНИКА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО	3
1.1. Определяне на понятието „Електроздадвижване“	3
1.2. Основни уравнения на движението при електроздадвижването	4
1.3. Привеждане на статичните и инерционните моменти към вала на двигателя	7
Глава 2 МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕТО	11
2.1. Механични характеристики на електродвигателите	11
2.2. Механични характеристики на производствени механизми	12
2.3. Устойчива работа на електромеханична система.....	14
2.4. Режими на работа на електродвигателя в електромеханична система.....	16
2.5. Основни показатели за регулиране на скоростта на електроздадвижванията.....	16
Глава 3 УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИГАТЕЛИ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК	19
3.1. Основни зависимости на двигателите за постоянен ток.....	19
3.2. Механични характеристики на двигателите за постоянен ток с независимо възбудждане	21
3.3. Пускане и спиране на електродвигателите за постоянен ток с независимо възбудждане	24
3.4. Електромеханични свойства на електродвигателите за постоянен ток с последователно възбудждане. Пускане, спиране и реверсиране	32
3.5. Електромеханични свойства на двигателите за постоянен ток със смесено възбудждане	39
3.6. Регулиране на скоростта на въртене на двигателите за постоянен ток.....	41
3.6.1. Регулиране на скоростта на въртене на електроздадвижването, чрез изменение на съпротивлението в котвената верига на двигателя	42
3.6.2. Регулиране на скоростта чрез изменение на магнитният поток	44
3.6.3. Регулиране на скоростта, чрез изменение на напрежението приложено към котвената верига на двигателя за постоянен ток	49
3.6.4. Импулсно регулиране на скоростта на двигателите за постоянен ток.....	50
Глава 4 УПРАВЛЕНИЕ НА ДВИГАТЕЛИ ЗА ПРОМЕНЛИВ ТОК	53
4.1. Механични характеристики на трифазните асинхронни електродвигатели.....	53
4.2. Пускане и спиране на трифазни асинхронни двигатели.....	58
4.3. Електромеханични свойства на трифазните синхронни двигатели. Пускане и спиране на синхронните електродвигатели	63
4.4. Начини за регулиране на скоростта на двигателите за променлив ток.....	66
4.4.1. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез изменение на активното съпротивление в ротора	66
4.4.2. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез превключване броя на чифтовете полюси	68
4.4.3. Регулиране на скоростта на асинхронни двигатели чрез изменение честотата на захранващото напрежение	72

Глава 5 УПРАВЛЕНИЕ НА СТЪПКОВИ ДВИГАТЕЛИ	78
5.1. Характеристики на стъпковите двигатели	78
5.2. Пускане, спиране и регулиране скоростта и посоката на въртене на стъпковите двигатели	87
Глава 6 ПРЕХОДНИ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ СИСТЕМИ	96
6.1. Същност и практическо значение на преходните процеси е електrozадвижването	96
6.2. Време за пускане и спиране на електrozадвижването	97
6.3. Механични преходни процеси на електrozадвижването при праволинейна механична характеристика на двигателя и постоянен статичен момент.....	100
6.4. Графичен и графоаналитичен методи за изчисляване на преходните процеси.....	104
6.5. Електромеханични преходни процеси при електrozадвижването.....	106
Глава 7 ИЗБОР НА МОЩНОСТТА НА ДВИГАТЕЛЯ В ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНАТА СИСТЕМА	109
7.1. Съображения при избора на мощността на електродвигателите	109
7.2. Загряване и охлаждане на електродвигателите	110
7.3. Режими на работа на електродвигателите от гледна точка на загряване	114
7.4. Избор на мощността на електродвигателите при продължителен, кратковременен и повторно-кратковременен режим на работа	115
Глава 8 ТОВАРНИ ДИАГРАМИ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИТЕ СИСТЕМИ	122
8.1. Значение на товарните диаграми за избиране на мощността на двигателя	122
8.2. Построяване на товарните диаграми	123
ИЗПОЛЗВАНИ ЛИТЕРАТУРНИ ИЗТОЧНИЦИ	124

УПРАВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ СИСТЕМИ

гл. ас. д-р инж. Николай Петков Вълов

рецензент: доц. д-р инж. Емил Константинов Кузманов

Първо издание

Пореден №21 от издателския план на Русенския университет за 2017 г.

Формат : 70/100/16

Тираж : 100

Издателство “БРЯГ”

ISBN 978-619-90584-1-1



9 786199 058411 >

ISBN 978-619-90584-1-1