

## ТРЕТА ЧАСТ

### ЛОКОМОТИВНА СИЛОВА УРЕДБА

Предназначението на локомотивната силова уредба е да преобразува подаваната енергия в механична и да я превръща в теглителна сила.

При някои видове локомотиви силовата уредба може да преобразува кинетичната енергия на влака в спирачна сила.

Основните елементи на всяка локомотивна силова уредба са тяговият двигател (двигатели) и силовата предавка (предавки).

При автономните локомотиви силовата уредба включва и бордово енергозахранващо устройство.

#### *Глава I*

### ЛОКОМОТИВНИ ДВИГАТЕЛИ

Локомотивните двигатели превръщат подадената към задвижването на локомотива енергия в механична, която чрез силовите предавки и водещите колооси се използва в крайна сметка като теглителна сила. По тази причина локомотивните двигатели се наричат още тягови (т.е. теглещи) двигатели. Въпреки, че по принцип не се отличават от съответните видове двигатели, прилагани в промишлеността, локомотивните двигатели, притежават редица специфични особености, които осигуряват нормалната им работа като източници на теглителна сила. Тези особености в конструкцията и параметрите на локомотивните двигатели са обусловени от техните тежки експлоатационни условия, характеризиращи се със:

- 1) наличие на сътресения, предизвикани от движението на локомотива по релсовия път (и особено от преминаването му по междурелсовите съединения);
- 2) необходимост от често пускане, регулиране, спиране и реверсиране на двигателите;
- 3) възникване на чести претоварвания на двигателите вследствие преминаването на локомотива по тежки (стръмни или намиращи се в лошо техническо състояние) участъци на релсовия път, както и при влошаване на енергозахранването му;
- 4) опасност от проникване на влага и прах в двигателя. Експлоатационните условия на тяговите двигатели, предназначени за локомотивите, работещи в подземните рудници, допълнително се утежняват от следните фактори:

- 1) ограничените размери на свободното пространство, в което може да бъде вместен двигателят;
- 2) взривоопасната руднична атмосфера (при някои рудници);
- 3) санитарните норми, ограничаващи степента на замърсяване на рудничната атмосфера.

В процеса на развитието на рудничното локомотивостроене подходящи за тежките руднични условия, са се оказали следните видове тягови двигатели: постоянно-токовият двигател с последователно (сериен) възбуждане, дизеловият двигател, пневматичният двигател, а напоследък - и различните видове хидравлични двигатели (последните в същност са елемент на хидравличната силова предавка).

*Окачване на тяговите двигатели.* Закрепването (окачването) на локомотивните двигатели към основната рама на локомотива или към рамата на талигата (при многоосовите локомотиви) трябва да е така осъществено, че да са удовлетворени следните основни изисквания:

- 1) максимално погасяване на възникващите при пътуването и предавани към корпуса на двигателя удари и вибрации;
- 2) възможност за поддържане на проста и устойчива кинематична връзка между двигателя и задвижваната колоос (колооси) при всички възможни при пътуването премествания на колооста по отношение на съответната рама.

При рудничните локомотиви се прилагат два основни начина за окачване на тяговите двигатели:

- 1) опорно-осово (трамвайно) окачване;

## 2) опорно-рамно окачване.

При трамвайното окачване тяговият двигател притежава две опори:

а) твърда (неподатлива) опора върху оста на съответната колоос (осъществена чрез плъзгащи разглобяеми лагери, монтирани или в корпуса на самия двигател, или в корпуса на междинната механична силова предавка);

б) опора върху съответната локомотивна или талигова рама, осъществена чрез междинно еластично (податливо на деформация) звено (най-често спирачни пружини). Положително качество на трамвайното окачване е, че то позволява създаването на компактни, съдържащи прости силови предавки, задвижвания на колоосите.

Недостатък на трамвайното окачване е твърдата, нееластична връзка между корпуса на двигателя и колооста, в резултат на което ударите и сътресенията, възникващи при търкалянето на колооста върху релсовия път, се предават непосредствено на двигателя и неговата силова предавка и обратно - инерционните сили, обусловени от масата на вибриращия при работа двигател, също така непосредствено се предават на релсовия път.

При опорно-рамното окачване двигателят е монтиран върху рамата на локомотива или на талигата и следователно теглото му се предава на релсовия път чрез ресорното окачване на рамата. Последното в значителна степен погасява ударите и сътресенията и с това създава добри експлоатационни условия както за локомотивния двигател, така и за релсовия път.

Недостатък на опорно-рамното окачване е необходимостта от използването на сложни силови предавки, запазващи работоспособността си при съществуващите (вследствие еластичността на ресорното окачване) значителни премествания на двигателя по отношение на задвижваните колооси.

## А. Тягови електродвигатели

### 15. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ ЗА ТЯГОВИТЕ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

*Основни изисквания.* Изискванията към тяговите електродвигатели могат да се разделят на три групи.

Към първата група, която характеризира работоспособността на двигателя в предвидените за него режими, се отнасят изискванията за електрическа и механична устойчивост.

Към втората група, която определя по-нормалното и рационално използване на двигателите при влаковата им работа, се отнасят изискванията за:

- равномерно разпределяне на натоварванията между двигателите;
- възможно най-малко изменение на натоварването на двигателите при колебание на захранващото ги напрежение;
- по-равномерно натоварване на стационарните енергозахранващи съоръжения (тяговата мрежа и тяговите подстанции);
- реализиране на по-високи средни технически скорости на движение при по-малък разход на енергия;
- възможност за регулиране на скоростта в широки граници;
- възможност за просто преминаване към генераторен режим (с оглед осъществяването на електрическо спиране).

Към третата група се отнасят изискванията за минимални тегло и габарити на двигателя, за сигурност и простота на конструкцията му.

Променливотоковите двигатели не удовлетворяват формулираните по-горе изисквания, поради което не са получили развитие и приложение като тягови двигатели, въпреки че са правени опити в това отношение.

Постояннотоковите двигатели от различните системи на възбуда удовлетворяват изискванията към тяговите двигатели (макар и в различна степен), поради което използването им за задвижване на локомотивите и в трите им варианта (с последователно, паралелно и смесено възбуждане) по принцип е възможно. Практически обаче най-голямо разпространение са получили двигателите с

последователно (сериен) възбуждане. Впоследствие подробно ще бъдат изложени предимствата на този вид двигатели пред другите постояннотокови двигатели.

### Основни параметри на тяговите електродвигатели

**Номинално напрежение**  $U_n$  - това е напрежението, за което е изчислен тяговият електродвигател. Независимо от начина на свързването им изолацията на тяговите двигатели се изчислява за пълното напрежение на енергозахранването на локомотива.

**Максимално допустимо напрежение** - за различните режими на тяговия двигател се ограничава, както следва: на  $1,15 U_n$  - при двигателен режим и на  $1,2 U_n$  при режим на електрическо спиране.

**Мощност.** Мощността, развивана от тяговия двигател, зависи от конкретните работни условия на локомотива (т.е. от наклона и състоянието на релсовия път, от вида и състоянието на включените във влаковата композиция вагони и т.н.), поради което в процеса на работа тя се изменя в широки граници. Развиваната от тяговия двигател мощност, характерът на нейното изменение, както и продължителността на периода, през който двигателят е работил, определят от своя страна топлинния режим, респ. степента на нагряването на двигателя.

Във връзка с това понятията за мощност на тяговия двигател са свързани както с фактора време, така и с нагряването му при работа.

Съществуват следните основни понятия за мощност на тяговия двигател:

- мощност на часовия режим  $N_{\text{ч}}$ ,
- мощност на продължителния режим  $N_{\text{прод}}$  и
- максимална мощност.

За номинална мощност на тяговия двигател условно се приема мощността на часовия режим.

*Мощност на часовия режим* (часова мощност) се нарича онази, измерена на вала на двигателя, полезна мощност, която в продължение на един час би предизвикала максимално допустимото за неговите части и намотки прегряване при положение, че на двигателя е осигурена вентилация, че същият е захранен с номинално напрежение и че първоначалната му температура е била равна на температурата на околната среда (последната обикновено се приема равна на  $25^{\circ}\text{C}$ ).

*Мощност на продължителния режим* (продължителна мощност) се нарича онази, полезна, измерена на вала на двигателя мощност, която би обусловила равновесно<sup>\*</sup> превишение на температурата на намотките и частите на двигателя, съвпадащо с допустимото за тях превишение на температурата при положение, че на двигателя е осигурена нормална вентилация, че същият е захранен с номинално напрежение и че първоначалната му температура е била равна на температурата на околната въздушна среда.

При работа на тяговите двигатели на нагряване са подложени намотките, колекторът и лагерите. Най-силно нагряваната част на двигателя, която определя мощността, е намотката.

Токът, теглителната сила, скоростта, коефициентът на полезното действие и другите параметри, отговарящи на даден топлинен режим на тяговия двигател, се наричат и означават съответно:

при часовия режим - часов ток  $I_{\text{ч}}$ , часова теглителна сила  $F_{\text{ч}}$ , часов к.п.д.  $\eta_{\text{ч}}$ ; при продължителния режим - продължителен ток  $I_{\text{прод}}$ , продължителна теглителна сила  $F_{\text{прод}}$ , пропродължителен к.п.д.  $\eta_{\text{прод}}$ .

*Максимална мощност* се нарича онази гранична мощност, до достигането на която тяговият двигател работи при нормална комутация. Максималната мощност трябва да съответствува на мощността на двигателя при номинално напрежение и двоен часов

---

<sup>\*</sup> Превिшение на температурата, при което настъпва изравняване на образуващата се в двигателя топлина с тази, която се отвежда от него.

ток. Тяговият двигател трябва да е в състояние да развива максималната си мощност в продължение на 1 min.

Коефициент на вентилацията  $\rho$  на тяговия двигател се нарича отношението между продължителния и часовия му ток:

$$\rho = \frac{I_{\text{прод}}}{I_{\text{ч}}}.$$

Големината на коефициента  $\rho$  зависи от интензивността на топлоотвеждането, като за различните начини за охлаждане на тяговите двигатели достига следните стойности:

- при двигателите с естествено охлаждане  $\rho = 0,4—0,5$ ,
- при двигателите със самовентилация (т.е. с вентилатор, монтиран върху вала на двигателя)  $\rho = 0,65—0,8$ ,
- при двигателите с принудителна вентилация  $\rho = 0,85—0,9$ .

*Основни характеристики на тяговите електродвигатели.* Към тях се отнасят електромеханичните (тягови и спирачни) и топлинните характеристики на двигателя.

Електромеханичните характеристики дават представа за свойствата на тяговия двигател, изразявайки зависимостта между протичащия през котвата на двигателя ток  $I_a$ , и величините, определящи неговия работен режим (тягов или спирачен).

Към електромеханичните характеристики на двигателя при тягов режим се отнасят зависимостите

$$n = f(I_a); M_{\text{в.д}} = f(I_a) \text{ и } n_{\text{сп}} = f(I_a). \quad (\text{III-1})$$

Към електромеханичните характеристики на двигателя при спирачен (генераторен) режим се отнасят зависимостите:

$$n_{\text{сп}} = f(I_a); M_{\text{сп}} = f(I_a) \text{ и } \eta_d = f(I_a). \quad (\text{III-2})$$

където

$n$ ,  $n_{\text{сп}}$  е честотата на въртене на ротора на двигателя съответно в тягов и в спирачен режим;

$M_{\text{дв}}$  - въртящият момент на вала на двигателя при тягов режим;

$M_{\text{сп}}$  - спирачния момент на вала на двигателя при генераторен режим;

$n_{\text{сп}}$ , - к.п.д. на двигателя.

Електромеханичните характеристики, съответстващи на работата на тяговия електродвигател при захранване с номинално напрежение, се наричат **естествени**.

Топлинните характеристики на тяговия електродвигател представляват зависимости, характеризиращи нагряването и охлаждането на двигателя при различни режими, а именно

$$\tau = f(t); T = f(I_a) \text{ и } \tau_{\infty} = f(I_a). \quad (\text{III-3})$$

където

$\tau$  е превишението на температурата в намотките на двигателя за даден момент;

$t$  - време;

$\tau_{\infty}$  - установеното (равновесното) превишение на температурата в намотките на двигателя при даден товар;

$T = \frac{C}{B}$  - топлинната времеконстанта:

$C$  - топлинният капацитет на нагряваната част, J/deg;

$B$  - коефициент на топлоотдаване,  $\text{W.m}^{-2} \text{ deg}^{-1}$ .

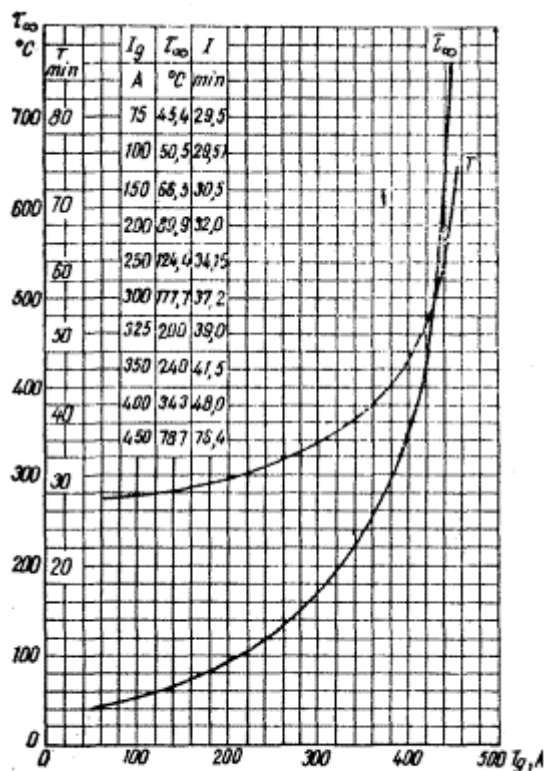
На фиг. III-1 кривата *a* показва нагряването, а кривата *b* — охлаждането на намотката при един и същи ток  $I_a$  на тяговия електродвигател; кривите *г* и *в* показват охлаждането на двигателя, при  $I_a = 0$  съответно в двата характерни варианта - при действаща и при изключена вентилация.

Понеже кривите *a* и *b* са дадени за един и същи ток, те се стремят към едно, и също установено превишение на температурата  $\tau_{\infty}$ .

Кривите  $\epsilon$  и  $\zeta$  се стремят към температурно повишение ч:  $\tau_{\infty} = 0$ , т.е. към температурата на околната среда. При това кривата  $\epsilon$  отговаря на по-голямото топлоотдаване и затова е с по-голяма стръмност.

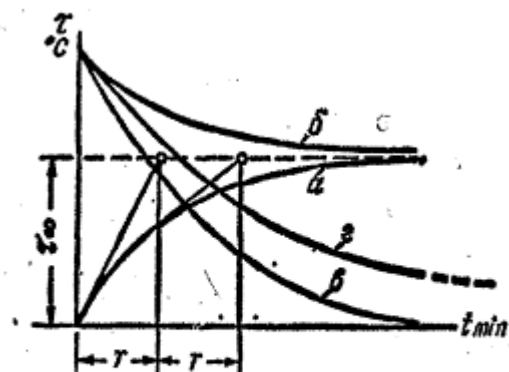
Топлинната времеконстанта  $T$  равновесното повишение на температурата  $\tau_{\infty}$  са топлинни параметри на намотката на двигателя.

Зависимостите  $T=f(I_a)$  и  $\tau_{\infty}=f(I_a)$  се получават въз основа на топлинни стендови изпитвания на съответния тягов двигател (на фиг. III-2 като пример са показани кривите на топлинните параметри на намотката на съветския тягов електродвигател ДРЭ-400).



Фиг. III-2. Топлинни параметри на намотката на котвата на тяговия двигател ДРЭ-400 при  $U=1500V$ , пълно поле и дебит на охлаждащия въздух  $70 m^3/min$

Чрез тази зависимост може да се построи мрежа от криви  $\tau_{\infty}=f(t)$  за различните токове на двигателя  $I_a$ . На фиг. III-1 е дадено графичното пояснение на топлинната времеконстанта  $T$ .



Фиг. III-1. Криви на нагряване и охлаждане: а, б—на нагряване и на охлаждане намотките на двигателя при единия ток; 1, 2—на охлаждане ( $I=0$ ) при действувания и при изключена вентил

## 16. ПОСТОЯННОТОКОВИ ТЯГОВИ ДВИГАТЕЛИ - ВИДОВЕ И ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Вече бе изтъкнато, че поради изключително добрите си регулиращи свойства постояннотоковите двигатели засега са единствено пригодни електродвигатели за задвижване на подвижния състав.

За задвижването на рудничните локомотиви най-подходящи са се оказали постоянно токовите тягови двигатели със серийно възбуждане.

1. *Електромеханични характеристики на постояннотоковия двигател при тягов (двигателен) режим.* Областта за приложение на даден двигател се определя въобще от особеностите на неговите електромеханични характеристики, като при тяговия електродвигател определящи са скоростната  $n=f(I_a)$  и моментната  $M_{в.д}=f(I_a)$  характеристика.

При постояннотоковите електродвигатели формулата за скоростната характеристика може да бъде получена от израза за баланса на подаваното към клемите на двигателя захранващо напрежение

$$U = E + I_a R_a \quad (III-4)$$

където

$R_a$  е общото съпротивление на котвената намотка;

$I_a$  – токът, протичащ през котвената намотка на двигателя;

$E$  - противоелектродвижеща сила на машината;

$$E = c\Phi n, \quad (\text{III-5})$$

тук  $\Phi$  е магнитният поток;

$c$  - константа, зависеща от конструкцията на машината;

$n$  - честотата на въртене на котвата.

От форм. III-4 и III-5 следва, че скоростната характеристика на двигателя ще има вида

$$n = \frac{U - I_a R}{c\Phi}. \quad (\text{III-6})$$

При серийния двигател възбудителната намотка е свързана последователно на котвената и затова магнитният поток се изменя право пропорционално на изменението на тока в котвата до достигането границата на магнитното насищане на полюсите:

$$\Phi = \gamma I_a, \quad (\text{III-7})$$

където

$\gamma$  е коефициент на пропорционалност.

След заместването на израза за магнитния поток (форм. III-7) във форм. III-6 получаваме хиперболичната зависимост

$$n' = \frac{A}{I_a}, \quad (\text{III-8})$$

където

$$n' = n + \frac{R}{\gamma c}; \quad A = \frac{U}{\gamma c}.$$

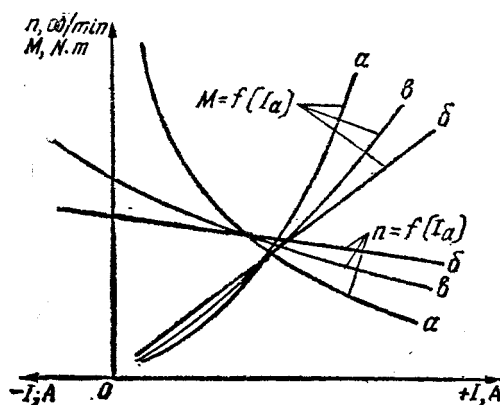
При шунтовия постояннотоков двигател магнитният поток зависи от захранващото напрежение, но не и от протичащия през котвата ток.

Следователно при неизменно захранващо напрежение  $U$  магнитният поток на машината  $\Phi$  ще бъде постоянен и скоростната характеристика на двигателя (вж. форм. III-6) ще представлява всъщност уравнение на права

$$n = A - BI_a \quad (\text{III-9})$$

където

$$A = \frac{U}{c\Phi}; \quad B = \frac{R}{c\Phi}$$



Фиг. III-3. Характеристика на постоянно-токовите двигатели при различен начин на възбуждане:

$\alpha$ —последователно;  $\beta$ —паралелно;  $\gamma$ —смесено

Скоростната характеристика на постоянно-токовия двигател със смесено възбуждане е междинна по отношение на серийната и шунтовата скоростна характеристика.

Скоростните характеристики на различните видове постояннотокови двигатели са показани на фиг. III-3.

Формулата за моментната характеристика на постояннотоковите електродвигатели може да бъде получена въз основа на формулите, изразяващи връзката между мощността върху вала на двигателя  $N_{в.д}$  и съответните механични и електрически параметри:

$$N_{в.д} = M_{в.д} \cdot 2\pi n, \quad (III-10)$$

$$N_{в.д} = N_{ел} \cdot \eta_d = UI_a \eta_d, \quad (III-11)$$

където

$N_{ел}$  е консумираната от двигателя електрическа мощност;

$\eta_d$  - к.п.д. на двигателя.

Решавайки съвместно горните два израза и приемайки условно, че  $U \approx E = c\Phi n$ , а  $\eta_d \approx \text{const}$  (това приемане е допустимо пред вид малката стойност на  $R_a$  при постояннотоковите машини вж. форм. III-4, както и поради сравнително тесните граници, в които се изменя техният к.п.д.), получаваме

$$M_{в.д} = \frac{UI_a \eta_d}{2\pi n} = \frac{c\Phi n I_a \eta_d}{2\pi n} = c' \Phi I_a. \quad (III-12)$$

При серийния двигател, работещ с не наситени магнитни полюси (вж. форм. III-7), изразът за момента (форм. III-12) се превръща в параболичната зависимост

$$M_{в.д} = c'' I_a^2 = c''' I_a^2, \quad (III-13)$$

където

$c'' = \frac{c' \eta_d}{2\pi}$  е константа.

При шунтовия двигател изразът за момента (форм. III-12) се превръща в линейна зависимост, тъй като  $\Phi = \text{const}$ :

$$M_{в.д} = c''' I_a, \quad (III-14)$$

където

$c''' = c' \Phi$  е константа.

Моментната характеристика на постояннотоковия двигател със смесено възбуждане е междинна по отношение на серийната и шунтовата моментна характеристика (фиг. III-3).

Коефициентът на полезното действие  $\eta_d$  характеризира съществуващите в тяговия двигател загуби на мощност, а характеристиката  $\eta_d f(I_a)$  - влиянието на степента на натоварване на двигателя върху големината на неговите загуби:

$$\eta_d = \frac{UI_a - \sum \Delta N}{UI_a}, \quad (III-15)$$

където

$\Delta N = \Delta N_e + \Delta N_{маг} + \Delta N_{мех} + \Delta N_{доб}$  са общите загуби на двигателя;

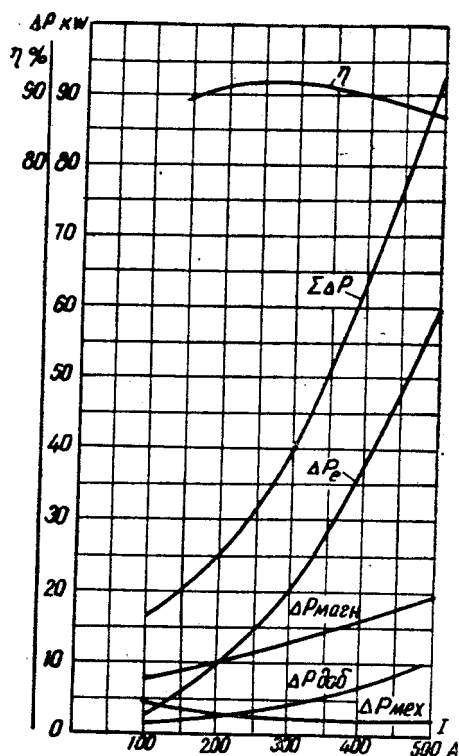
$\Delta N_e$  - електрическите загуби на двигателя, изразяващи се в образуването на джаулова топлина;

$\Delta N_{маг}$  - магнитните загуби;

$\Delta N_{мех}$  - механичните загуби (загуби от триене между колектора и четките, от триене в лагерите, загуби за самовентилация);

$\Delta N_{доб}$  - добавъчните загуби (определят се от токовете на Фуко, възникващи в проводниците и зъбите на котвата, в бандажите и в полюсните обувки).

На фиг. III-4 са показани кривите, които отразяват изменението на различните загуби на мощност, както и изменението на общия к.п.д. на един постояннотоков електродвигател. Вижда се, че различните загуби в различна степен зависят от големината на натоварването,



Фиг. III-4. Загуби и к. п. д. на двигателя ДПЭ-400

като най-силно се влияят от него електрическите, а сравнително най-слабо механичните загуби.

2. *Сравнителна оценка на постоянно токовите тягови двигатели.* Сравнението на основните електромеханични характеристики на различните видове постоянно токови двигатели (фиг. III-3) показва, че за условията на рудничния локомотивен транспорт най-подходящи са серийните тягови електродвигатели. Техните предимства са следните:

- 1) при една и съща големина на пусковия ток те развиват по-голям пусков момент;
- 2) притежават по-голяма претоварваща способност и следователно при едни и същи работни условия мощността им ще бъде по-малка;
- 3) при увеличаване на товара честотата на въртенето им рязко се намалява и в резултат консумираната мощност  $N=M\omega$  остава почти неизменна;
- 4) работят по-добре, обединени в обща механична система (каквато е поставеният

върху релсите локомотив), и по-добре разпределят помежду си общия товар.

Характерно за многодвигателните локомотиви е, че тяговите им електродвигатели са еднотипни и равни по мощност, а задвижваните от тях колооси са с еднакви геометрични параметри. При това положение се предполага равномерно разпределение на общия товар между отделните двигатели. Съществуват обаче фактори, които предизвикват преразпределение в натоварването. Такива фактори са:

- а) нееднаквостта на диаметрите на бандажите на колелата (получена в резултат на неточност при обработката им или в резултат на износването им);
- б) нееднаквостта на електромеханичните характеристики на двигателите.

Известно е, че скоростта  $V$ , с която се придвижва центърът на кръг, търкалящ се без приплъзване по права, е

$$V = V_{\text{периф}} = \pi n D, \quad (\text{III-16})$$

където

$V_{\text{периф}}$  е периферната скорост на точките, разположени по окръжността на контактуването;

$n$  - честотата на въртенето на кръга;

$D$  - диаметърът на окръжността.

Доколкото движението на локомотива е резултат от търкалянето върху релсите, на обединени в обща механична система водещи колела, форм. III-16 остава в сила, като участващите в нея величини ще имат следното значение:

$V$  - постъпателна скорост на локомотивната рама;

$n_k$  честота на въртене на дадена колоос;

$D_k$  - диаметър на окръжността, по която бандажът на ходовото колело контактува с релсата.

Очевидно локомотивната рама е механичното звено, което налага една обща за всички водещи колооси на многодвигателния локомотив периферна скорост:

$$V = V_{\text{периф}1} = V_{\text{периф}2} = \dots = V_{\text{периф}z} \quad (\text{III-17})$$

където  $z$  е общият брой на водещите колооси. От форм. III-16 следва



$$n_k = \frac{v}{\pi D_k} \quad (\text{III-18})$$

От форм. III-17 и III-18 се вижда, че в случая, когато водещите козела контактуват с релсите по окръжности с еднакъв диаметър, водещите козелооси ще се въртят с еднаква честота  $n_k$ , като всяко различие в диаметрите  $\Delta D_k$  ще предизвиква съответна разлика  $\Delta n_k$  в честотите на въртенето им.

Тъй като всяка водеща козелоос е кинематично свързана със съответен тягов двигател, честотата на въртене  $n$  на ротора му ще бъде право пропорционална на  $n_k$

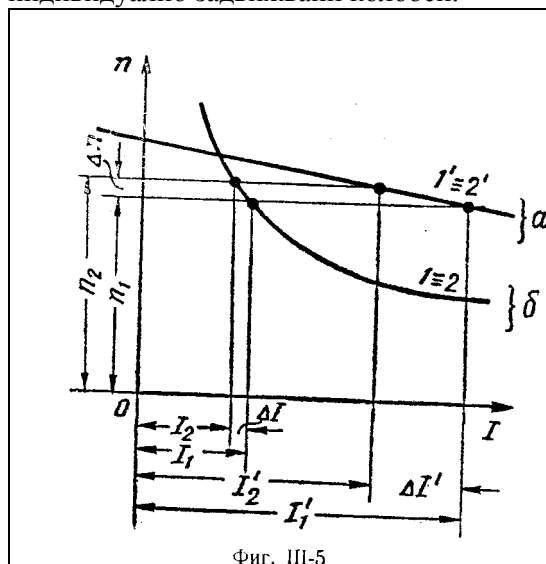
$$n = \mu \cdot n_k, \quad (\text{III-19})$$

където  $\mu$  е предавателното число на силовата предавка.

Следователно на всяка разлика  $\Delta n_k$  в честотите на въртене на водещите козелооси ще съответствува разлика в честотите на въртене  $\Delta n$  на задвижващите ги двигатели.

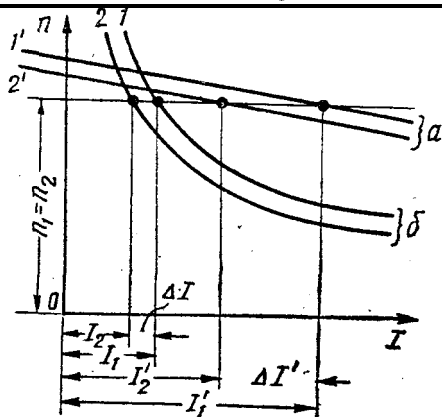
В светлината на изложеното по-горе, като използваме основните електромеханични характеристики на постояннотоките тягови двигатели, ще анализираме степента на тяхната пригодност за паралелна работа на обща механична система.

За по-голяма простота и прегледност ще бъдат разгледани двата най-характерни постояннотоккови двигателя - серийният и шунтовият, приложени в локомотив с две индивидуално задвижвани козелооси.



Фиг. III-5

Показаните на фиг. III-5 криви илюстрират случая когато скоростните характеристики на двигателите 1 и 2 (кривите  $a$  се отнасят за шунтовите двигатели, а кривите  $b$  - за серийните) са напълно еднакви, обаче диаметрите на водещите козела се различават, вследствие на което и  $n_1 \neq n_2$ . Вижда се, че при една и съща разлика  $\Delta n$  в честотата на въртене на двигателите тяхното натоварване ( $I_1$  и  $I_2$  за серийните и  $I'_1$  и  $I'_2$ , за шунтовите) е различно. При това двата серийни двигателя се натоварват значително по-равномерно, отколкото двата шунтови ( $\Delta I < \Delta I'$ ).



Фиг. III-6

Фиг. III-6 илюстрира случая, когато скоростните характеристики на двата паралелно работещи локомотивни двигателя не са еднакви (вж. кривите 1 и 2 за серийните и кривите 1' и 2' за шунтовите двигатели), докато размерите на ходовите козела на водещите козелооси са напълно еднакви и затова  $n_1 = n_2$ . Очевидно е, че и в този случай разпределението на натоварването е много по-благоприятно при серийните, отколкото при шунтовите двигатели ( $\Delta I < \Delta I'$ ).

Недостатъците на серийните тягови електродвигатели са следните:

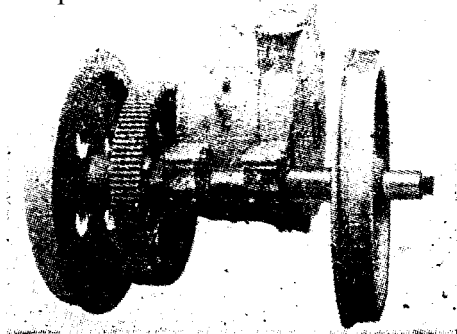
- 1) неустойчива честота на въртене в зоната на малките натоварвания (когато малки намалявания на товара предизвикват опасни увеличения на скоростта);
- 2) липса на гранична честота на въртене, с превишаването на която двигателят автоматично да попада в режим на генераторно спиране.

## 17. ОСОБЕНОСТИ НА РУДНИЧНИТЕ СЕРИЙНИ ТЯГОВИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

По принцип устройството на серийния тягов електродвигател не се различава от това на обикновения серийен постоянен ток двигател.

Твърде специфичните условия, при които работят тяговите електродвигатели на рудничните локомотиви, обаче налагат те да отговарят на следните изисквания:

- 1) при пускането на тяговия двигател той трябва да е в състояние да развива въртящ момент, 2—2,5 пъти по-голям от  $M_{ном}$ ;
- 2) в отделни периоди от движението двигателят да допуска 1,5—2 кратно превишаване на минималната му мощност, без това да води до повреди на колектора или до други механични повреди;
- 3) тяговият двигател трябва да допуска работа в генераторен режим при голяма честота на въртене на котвата и при наличието на токове, чувствително превишаващи по големина номиналния ток на двигателя без появата на опасно искрене по колектора и без пробиви в изолацията на намотката;

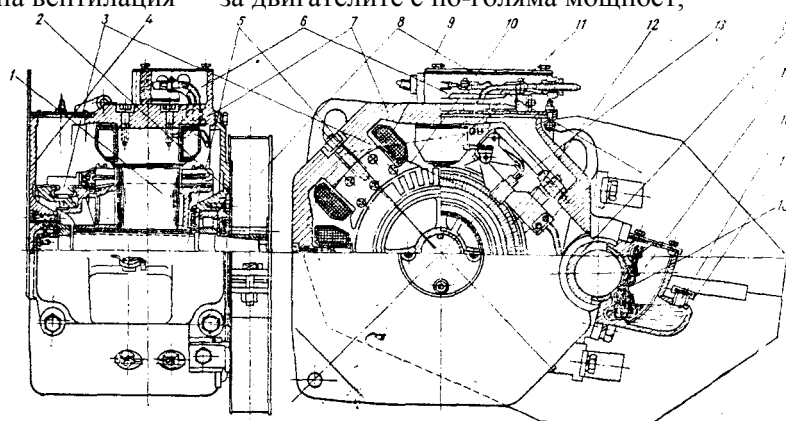


Фиг. III-7. Непосредствено опорно-осово

- 4) тяговият двигател трябва да допуска въртенето на котвата в двете посоки при равностойни условия на превключване;
  - 5) нормалната работа на двигателя не трябва да се нарушава от сътресения, възникващи при движението на локомотива по рудничните релсови пътища, дори когато скоростта на движението достигне конструктивната скорост на локомотива.
- Горните изисквания, ограничените размери, в които трябва да бъде вместен тяговият двигател, и съществуващата взривоопасна

атмосфера в някои рудници са наложили следните особености в конструктивното оформление на тяговите електродвигатели:

- 1) тяговите серийни двигатели за рудничните локомотиви обикновено се произвеждат с 4 главни и 4 спомагателни полюса, като четките се разполагат точно по осовите линии на главните полюси;
- 2) корпусът на тяговите двигатели е с масивна (най-често лята) стоманена конструкция;
- 3) корпусът на тяговите двигатели на рудничните локомотиви е с напълно затворена, а в някои случаи (напр. при акумулаторните локомотиви) - и с взривобезопасна конструкция (тези двигатели са с естествено охлаждане);
- 4) корпусите на тяговите двигатели на промишлените локомотиви са с вентилационни отвори, като охлаждането им се осъществява съответно чрез:  
самовентилация — за двигателите с мощност до 150 kW, и  
принудителна вентилация — за двигателите с по-голяма мощност;



Фиг. III-8. Двигател ДК-801А (разрез):

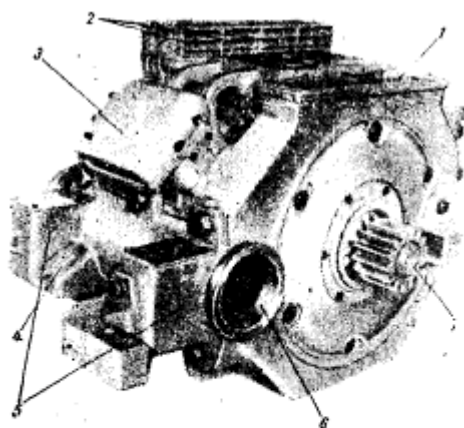
1 - пакет на котвата; 2,4 - капази; 3 - колектор; 5 - вал на двигателя; 6 - клемна кутия; 7 - корпус на двигателя; 8 - защитен кожух на редуктора; 9 - бобина на главните полюси; 10 - накрайници; 11 - допълнителни полюси; 12 - четкодържател; 13 - четки; 14 - черупки на осовия лагер; 15 - камера за мажещото устройство на осовия лагер; 16 - масленка; 17 - маслена вана; 18 - мажещи фитили

5) съотношението между дължината на котвения пакет  $\ell_a$  и диаметъра му  $D_a$  е една твърде характерна за тяговите двигатели величина, която зависи от мощността на двигателя, от начина на окачването му (опорно-рамно или опорно-осово), разположението на вала на двигателя по отношение оста на колооса (перпендикулярно или паралелно) и най-сетне - от широчината на релсовия път. За паралелно разположените и опорно-осово окачени тягови електродвигатели на рудничните локомотиви  $\ell_a < D_a$  и отношението  $\frac{\ell_a}{D_a}$  има стойност 0,4 — 0,6 (като  $D_a$  достига до

0,64  $D_{\text{колоос}}$ ). В останалите случаи обикновено  $\ell_a < D_a$  и отношението  $\frac{\ell_a}{D_a}$  малко се

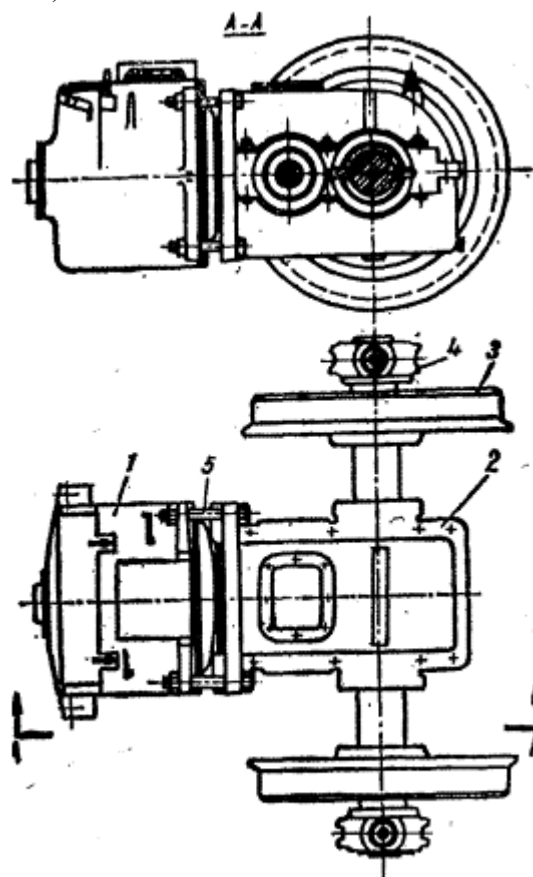
различава по стойност от това на обикновените серийни двигатели;

6) в корпусите на тяговите двигатели с непосредствено опорно-осово окачване (фиг. III-7) се вграждат специални черупкови лагери, чрез които двигателят се укрепва върху оста на локомотивната колоос (вж. фиг. III-8 и III-9).



Фиг. III-9. Тягов електродвигател за промишлен локомотив, пригоден за непосредствено опорно-осово окачване и принудително охлаждане (GBM 185/1200);

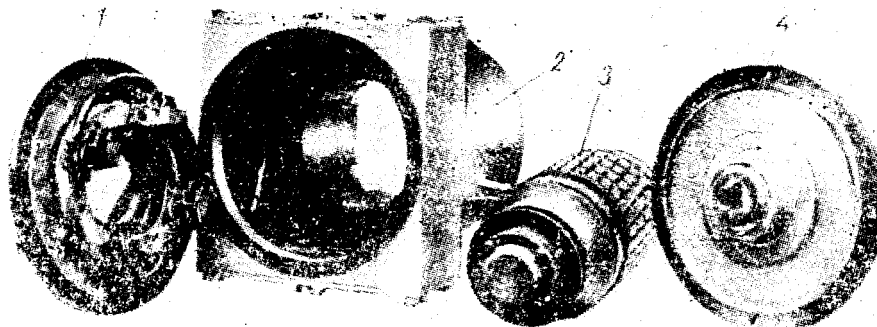
1—клапак на отвора на входната вентилационна струя (при работно положение на двигателя клапакът се свали); 2—отвори за изходната вентилационна струя; 3—клемна кутия; 4—масленка; 5—камера за мажещото устройство на осовия лагер; 6—опорно-осов лагер; 7—вал на двигателя



Фиг. III-10. Косвено опорно-осово окачване на тягов двигател: 1-двигател; 2-редуктор; 3-колоос; 4-букса; 5-болтове, свързващи двигателя с редуктора

7) корпусите на тяговите двигатели с косвено опорно-осово окачване (фиг. III-10) са пригодени за челно (фланцово) свързване с редуктора на силовата предавка;

8) корпусите на тяговите двигатели с опорно-рамно окачване са пригодени за нормално (чрез опорни крачета) свързване с конструкцията на локомотивната рама (вж. фиг. III-11).



Фиг. III-11. Тягов електродвигател, пригоден за опорно-рамно окачване:  
1-капак с четкодържателен щит; 2-корпус с опорни крачета; 3-котва; 4-капак.

## Б. Тягови двигатели с вътрешно горене

### 18. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

В подвижния състав на релсовия транспорт по принцип могат да бъдат използвани следните видове тягови двигатели с вътрешно горене:

дизеловият двигател;

бензиновият (карбураторният) двигател и

газовата турбина.

Най-разпространени са дизеловите двигатели, тъй като в сравнение с тях бензиновите са по-неикономични, а газовите турбини въпреки несъмнените си положителни качества (по-голяма относителна мощност, по-евтино гориво и по-ниски разходи за обслужване и ремонт) значително им отстъпват по отношение на к.п.д.

Засега газовите турбини не са намерили приложение в рудничните локомотиви. За задвижването на тези локомотиви се използват изключително дизелови двигатели, които напълно са изместили бензиновите поради следните причини:

1) дизеловите двигатели работят без система за електрическо запалване, която в руднични условия би могла да предизвика експлозия на газо-въздушната или прахово-въздушната смес;

2) дизеловите двигатели използват гориво, което притежава по-ниска точка на възпламеняване от бензина, в резултат на което се намалява опасността от пожари и експлозии в самия локомотив;

3) при дизеловия двигател се осъществява по-пълно изгаряне на горивото, отколкото при бензиновия;

4) дизеловият двигател работи с по-евтино гориво (нафта) и притежава по-висок термичен к.п.д., което обуславя и по-голямата му икономичност.

Дизеловите двигатели (както и двигателите с вътрешно горене въобще) притежават обаче неподходящи за един тягов двигател характеристики, тъй като:

1) при малки ъглови скорости не създават въртящ момент;

2) за привеждането им в движение (пускане) е необходимо развъртането им до определена скорост от специален пусков двигател;

3) най-икономичната работа на дизеловите двигатели отговаря на напълно определен режим, който във всеки отделен случай се определя от една постоянна големина на въртящия момент.

Приспособяването на дизеловите двигатели към съществуващите в релсовия транспорт условия на работа се постига чрез използването на регулируема силова предавка, свързваща вала на двигателя със задвижваната около него колоос. Тази предавка трябва да позволява изменение в широки граници (в съответствие с условията на движението)

както на тангенциалната теглителна сила, така и на скоростта на движение при постоянен или незначително изменящ се въртящ момент на вала на двигателя.

## 19. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ЛОКОМОТИВНИТЕ ДИЗЕЛОВИ ДВИГАТЕЛИ

Основните характеристики на дизеловия двигател изразяват зависимостта на неговите ефективна мощност  $N_e$ , въртящ момент  $M_g$ , ефективен к.п.д.  $\eta_e$  и относителен разход на гориво  $g_e$  от честотата на въртене  $n$  на колянвия вал.

Основните характеристики зависят от параметрите на работния процес на дизеловия двигател, към които се отнасят:

коэффициентът на пълнота на индикаторната диаграма  $\mu_i$ , който характеризира съотношението между площите на реалната и теоретичната  $p$ - $V$ -диаграма и зависи от степения показател на политропата, от налягането при всмукването на въздух в цилиндъра от налягането при изтласкването на изгорелите газове, от организацията на процеса на разпръскване и изгаряне на горивото;

коэффициентът на запълване на цилиндриите с въздух  $\eta_v$ , който представлява отношението

$$\eta_v = \frac{G}{G_h},$$

където

$G$  е действителното количество въздух, което се намира в цилиндъра на работещия двигател при започването на процеса “сгъстяване”;

$G_h$  - количеството въздух, което би запълнило цилиндъра в момента на започване на процеса “сгъстяване”, ако налягането в него е било равно на атмосферното.

Практически  $G < G_h$ , поради наличието на хидравлични загуби на налягане  $\Delta p$  в смукателните тръби и клапани на двигателя ( $\Delta p \sim v_b^2$ , където  $v_b$  е скоростта на засмукания въздух);

коэффициент, характеризиращ излишъка на въздух в цилиндъра  $\alpha$ , представлява отношението

$$\alpha = \frac{G}{G_0},$$

където  $G_0$  е теоретичното количество въздух, необходимо за пълното изгаряне на впръснатото в цилиндъра гориво.

Коефициентът  $\alpha$  (който винаги е  $>1$ ) трябва да бъде по възможност минимален. Той зависи от качеството на образуването на сместа;

средно индикаторно налягане  $p_i$  представлява отношението

$$p_i = \frac{\oint p dV}{V_h} = \frac{A_i}{V_h},$$

където

$A_i$  е индикаторната механична работа;

$V_h$  - работният обем на цилиндъра.

1. *Индикаторна мощност*  $N_i$ . Зависи от броя на цилиндриите  $z$ , от броя на тактовете на работния процес  $\tau$  и от честотата на въртене на колянвия вал  $n$ :

$$N_i = \frac{A_i z n}{\tau} = \frac{2 p_i V_h z n}{\tau}. \quad (\text{III-20})$$

2. *Индикаторен к.п.д.*  $\eta_i$ . Представлява отношението на топлината, преобразувала се в цилиндриите в механична работа, към общото количество топлина, образувана в цилиндриите при изгарянето на горивната смес.

3. *Ефективна мощност*  $N_e$ . Това в същност е полезната мощност, която се получава на вала на двигателя. Различава се от индикаторната мощност с величината на загубите

$\Delta N$  в двигателя, обусловени от хидравличните съпротивления, пречатстващи всмукването на въздух в цилиндрите и изтласкването на изгорелите газове от тях; съпротивленията от триенето на буталата в стените на цилиндрите; съпротивленията от триене в лагерите; съпротивленията на спомагателните устройства (разпределителен вал, горивна, маслена и водна помпа и др.):

$$N_e = N_i - \Delta N. \quad (\text{III-21})$$

4. *Механичен к.п.д.*  $\eta_M$  Представлява отношението между ефективната и индикаторната мощност на двигателя:

$$\eta_M = \frac{N_e}{N_i} = 1 - \frac{\Delta N}{N_i}. \quad (\text{III-22})$$

5. *Ефективен к.п.д.*  $\eta_e$

$$\eta_e = \frac{N_e}{m_t Q_H}, \quad (\text{III-23})$$

където

$m_t$  е масовият разход на гориво, kg/s;

$Q_H'$  - низшата топлина на изгарянето на горивото, kJ/s.

6. *Относителен ефективен разход на гориво*  $g_e$ .

$$g_e = \frac{m_t}{N_e}, \text{ kg/kW.s.} \quad (\text{III-24})$$

7. *Въртящ момент на вала на дизеловия двигател*  $M_d$

Обулавя се от ефективната мощност на двигателя и от честотата на въртене на колянвия вал:

$$M_d = \frac{N_e}{2\pi n}. \quad (\text{III-25})$$

От форм. III-22 и III-23 следва, че

$$N_e = \eta_M N_i = \frac{\eta_M 2p_i V_h z n}{\tau}$$

Тогава форм. III-25 ще добие вида

$$M_d = \frac{z}{\tau \pi} p_i V_h \eta_M. \quad (\text{III-26})$$

Една от главните особености на дизеловия двигател е, че подаването на въздух в цилиндрите не се регулира в процеса на работата му. Колебанията на количеството засмукан въздух (доколкото те съществуват) се обуславят от изменящите се хидравлични съпротивления във входните и изходните отвори на цилиндрите, както и от динамичната съставляваща на напора.

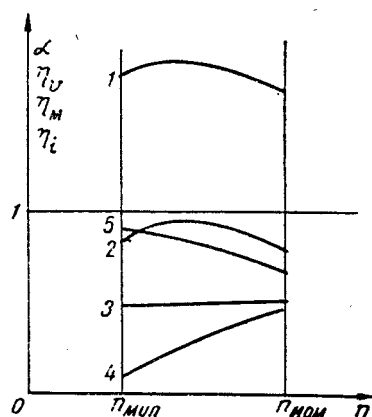
На фиг. III-12 са показани зависимостите на параметрите на работния цикъл на дизеловия двигател от честотата на въртене на колянвия вал при максимално и постоянно захранване на цилиндрите с гориво. Вижда се, че с увеличаването на честотата на въртене коефициентът на напълване на цилиндрите  $\eta_v$  расте, достига максимум и след това намалява (крива 1). Първоначалното му нарастване се дължи на увеличаващата се динамична компонента на напора, а намаляването му след достигане на максимума — на все по-силно проявяващите се хидравлични съпротивления в смукателните и изпускателните отвори на цилиндрите.

Коефициентът  $\alpha$ , който характеризира излишъка на въздух в цилиндрите, се изменя аналогично по същите причини (вж. крива 2), в резултат на което отношението  $\frac{\eta_v}{\alpha}$

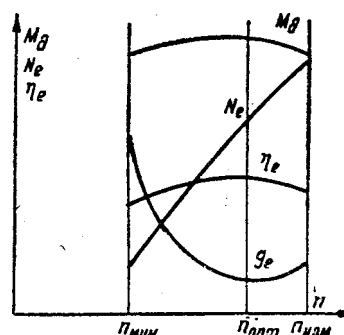
остава почти непроменено (вж. крива 3).

Първоначално намаляването на  $\alpha$  благоприятно влияе върху параметрите на термодинамичния цикъл; след прехвърлянето на определена стойност обаче горивото

престава да изгаря напълно, в резултат на което двигателят започва да дими.



Фиг. III-12



Фиг. III-13 Работни характеристики на дизелов двигател

Индикаторният к.п.д.  $\eta_i$  расте с увеличаването честотата на въртене на вала (вж. крива 4) предимно поради подобреното разпръскване на горивото, докато механичният к.п.д.  $\eta_m$  намалява поради нарастването на механичните и хидравличните съпротивления в двигателя (вж. крива 5).

За всеки дизелов двигател съществува гранична честота на въртене на коляновия вал, под която двигателят не може да работи. Тази минимална устойчива честота на въртене  $n_{min}$  зависи преди всичко от начина за впръскване на гориво при образуването на сместа.

Всеки дизелов двигател притежава оптимална честота на въртене  $n_{opt}$ , при която въртящият момент на вала му  $M_d$  и ефективният к.п.д.  $\eta_e$  достигат максимални стойности при минимален относителен ефективен разход на гориво  $g_e$ . При повечето дизелови двигатели  $n_{opt} < n_{nom}$ .

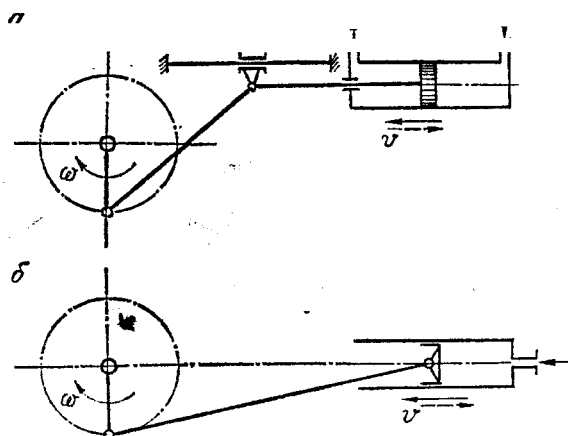
На фиг. III-13 е показан общият вид на работните характеристики на дизеловия двигател. Характеристиките се наричат естествени или външни, когато са снети при подаване на такова количество гориво в двигателя, че същият при номинална честота на въртене  $n_{nom}$  развива номиналния си въртящ момент.

## В. Пневматични тягови двигатели

### 20. ОБЩИ СВЕДЕНИЯ

Пневматичните двигатели намират приложение при рудничните локомотиви поради следните свои положителни качества:

- 1) простота и ниска металопоглъщаемост на конструкцията;
- 2) сигурно действие при работа в прашна, влажна и агресивна среда;
- 3) просто обслужване и поддържане;
- 4) леко управление, позволяващо плавно пускане и спиране на локомотива;
- 5) малка чувствителност към външни динамични удари;
- 6) способност да издържат неограничени по големина и продължителност претоварвания (включително и такива, които предизвикват спирането на локомотива) без повреди и без използването на защитни средства;
- 7) пълна взривобезопасност;
- 8) отработеният въздух подобрява проветряването на минните изработки.



Фиг. III-14. Преобразуващи механизми при бутални пневматични двигатели: *a*—кривошипно-кръстоглав механизъм; *b*—коляно-мотовилков механизъм

Пневматичните двигатели работят по-добре, отколкото другите видове двигатели при особено тежки експлоатационни условия, характеризиращи се с резки колебания на натоварването, с необходимост от чести промени в посоката на движение, чести внезапни спирания, при наличие на динамични удари и вибрации.

От съществуващите видове пневматични двигатели (бутални, лопаткови, ротационни, зъбни и винтови) в задвижването на рудничните локомотиви намират приложение само радиално-буталните двигатели с едностранно или с двустранно действие.

В структурно отношение буталните пневматични двигатели са по-сложни от роторните (лопаткови, зъбни и винтови), тъй като в кинематичната им верига участва т. нар. “преобразуващ механизъм”, който превръща възвратно-постъпателното движение на буталото, във въртеливо движение на главния вал.

## 21. ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПНЕВМАТИЧНИЯ БУТАЛЕН ДВИГАТЕЛ

Основните характеристики на пневматичния бутален двигател изразяват зависимостите:  $N_e=f(n)$ ,  $M_d=f(n)$  и  $\eta=f(n)$ , където  $n$  е честотата на въртене на главния вал на двигателя. Общият вид на тези характеристики е показан на фиг. III-15.

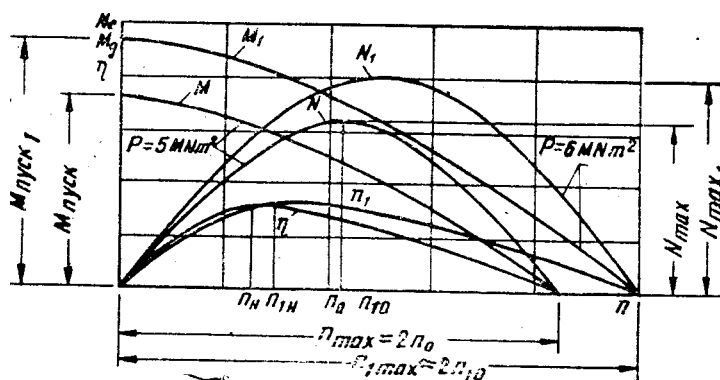
Характеристиката  $N_e=f(n)$  е параболична крива, която започва от началото на координатната система и достига своето максимално значение  $N_{max}$  при честота на въртене  $n_0$ . При по-нататъшното увеличаване на честотата на въртене на главния вал мощността намалява и при  $n_{max} \approx (2 \div 2,8)$  тя става равна на нула.

Характеристиката  $M_d=f(n)$  е крива с елиптичен характер, която в средната си част е близка до правата линия. Въртящият момент е максимален при  $n=0$  и се анулира при  $n=n_{max}$ .

Кривата на характеристиката  $\eta=f(n)$  достига своя максимум при честота на въртене  $n \approx (0,6 \div 0,7)n_0$ , която се приема за номинална честота на въртене на двигателя  $n_n$ . Мощността  $N_n$  и моментът  $M_n$ , съответстващи на номиналната честота на въртене, се приемат за номинални.

Буталните пневматични двигатели притежават много добри пускови качества - пусковият им въртящ момент е 1,5—2,1 пъти по-голям от номиналния момент.

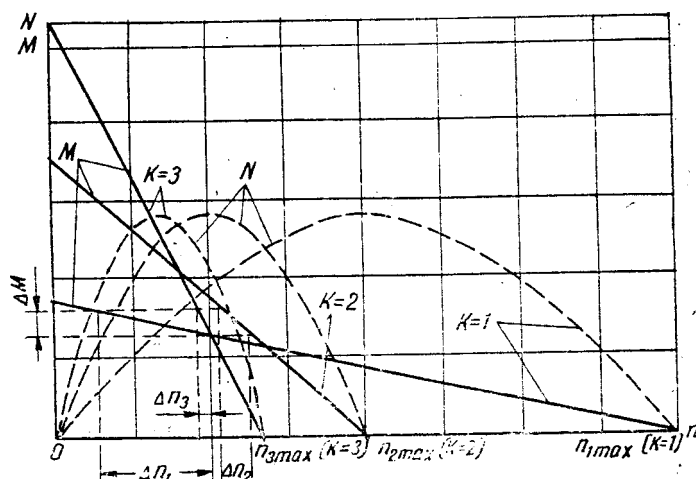




Фиг. III-15. Работни характеристики на пневматичен бутален двигател

Изменението на работното налягане на съгъстения въздух е ефикасно средство за плавното изменение на работните характеристики на двигателя в широки граници. Така изменението на налягането с  $1,10^5 \text{ N/m}^2$  изменя големината на  $N$  и  $M$  с около 20% в сравнение със стойността им при същата честота на въртене, но при предишното налягане. На фиг. III-14 са показани основните характеристики на двигателя при налягане на въздуха  $5,10^6$  и  $6,10^5 \text{ N/m}^2$ . Използването на въздух с по-високо налягане увеличава стойностите на  $n_n$ ,  $n_0$  и  $n_{max}$ , но това изменение е незначително в сравнение с увеличението на  $N$  и  $M$ . Намалването на работното налягане изменя работните характеристики в обратна посока.

На фиг. III-16 са показани работните характеристики на три конструктивно равностойни бутални двигателя, отличаващи се само по кратността на действието ( $K=1$ ,  $K=2$  и  $K=3$ ). Максималната мощност на трите двигателя е еднаква, но се достига при различни честоти на въртене на главния вал. При това характерните честоти на въртене ( $n_0$  и  $n_{max}$ ) при двигателите с многократно действие са  $K$  пъти по-малки от съответните честоти на въртене при двигателите с еднократно действие. Пусковият момент при двигателите с многократно действие е съответно  $K$  пъти по-голям от този при двигателите с еднократно действие.



Фиг. III-16

От показаните на фиг. III-15 характеристики се вижда също така, че едно и също изменение на въртящия момент на вала на двигателя  $\Delta M$  предизвиква различно изменение  $\Delta n$  в честотата на въртене на вала на двигателите с различна кратност на действието. По-малките изменения се получават при двигателите с по-голяма кратност. Ако пневматичният бутален двигател има встроена зъбна предавка, която предавайки въртящия момент на изходния вал, съответно понижава или повишава честотата на въртене, получавана на главния вал, предавателното число на предавката оказва същото влияние върху характеристиките на двигателя, както и кратността  $K$ . Очевидно

е, че една многоскоростна зъбна предавка би осигурила работата на двигателя при оптимален режим, ако тя бъде превключвана в съответствие с изменящия се външен товар.