

ные характеристики и методы расчета.

§ I. Двигатель рулевой машины

Предполагается, что в качестве двигателя выбирается управляемый двигатель постоянного тока с независимым возбуждением (рис. I.3).

Момент двигателя

$$M_g = k_g \Phi i_a, \text{ Н.м.}, \quad (I.1)$$

где Φ - магнитный поток возбуждения, Вб;
 i_a - ток в обмотке якоря, А;
 k_g - коэффициент момента, $\frac{\text{Н.м.}}{\text{А}}$

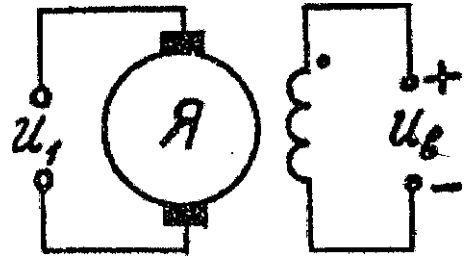


Рис. I.3 К определению уравнений двигателя

Уравнение баланса э.д.с. в обмотке якоря

$$U_1 = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E, \quad (I.2)$$

где $E = c_1 \Phi \omega_g, \text{ В.}$ - противоэлектродвижущая сила индукции в якоре;

- c_1 - коэффициент, $\frac{\text{В.с.}}{\text{Вб.}}$
- ω_g - угловая скорость вращения якоря,
- L_a - индуктивность якоря, Г;
- R_a - активное сопротивление якоря, Ом.

Механическое уравнение движения якоря

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = M_g - M_H, \quad (I.3)$$

где J_g - момент инерции якоря, Н.м.с²;
 M_H - момент внешней нагрузки, Н.м.

Обозначая $k_E = c_1 \Phi$ - коэффициент противо - э.д.с., В.с;

$k_i = k_g \Phi$ - коэффициент момента двигателя по току в якоре, $\frac{\text{Н.м.}}{\text{А}}$,
 из уравнений (I.1), (I.2) и (I.3) получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + k_E \omega_g &= U_1, \\ -k_i i_a + J_g \frac{d\omega_g}{dt} &= -M_H. \end{aligned} \quad (I.4)$$

Обозначая через $\mathcal{D} \equiv \frac{d}{dt}$ - линейный оператор дифференцирования, получим

$$\begin{aligned} (L_a \mathcal{D} + R_a) i_a + k_E \omega_g &= U_1, \\ -k_i i_a + J_g \mathcal{D} \omega_g &= -M_H, \end{aligned} \quad (I.5)$$

или, вводя обозначения $T_A = \frac{L_A}{R_A}$ - электромагнитная постоянная времени цепи якоря двигателя, с; $T_g = \frac{T_A R_A}{K_i K_E}$ - электромеханическая постоянная времени двигателя, с, представим систему уравнений (I.5) в виде

$$(T_g T_A D^2 + T_g D + 1) i_A = T_g D \frac{U_1}{R_A} + \frac{M_H}{K_i} \quad (I.6)$$

либо в виде

$$(T_g T_A D^2 + T_g D + 1) \omega_g = \frac{U_1}{K_E} - \frac{M_H R_A}{K_i K_E} (T_g D + 1). \quad (I.7)$$

Рассмотрим собственные свойства двигателя, полагая $M_H = 0$, по уравнению (I.7)

$$(T_g T_A D^2 + T_g D + 1) \omega_g = \frac{U_1}{K_E}. \quad (I.8)$$

Характеристическое уравнение $T_g T_A x^2 + T_g x + 1 = 0$ имеет следующие корни: $x_1, x_2 = -\frac{1}{2T_A} \pm \frac{1}{2T_A} \sqrt{1 - \frac{4T_A}{T_g}}$; при $T_g = 4T_A$ корни становятся кратными.

Практически для двигателей рассматриваемого типа в диапазоне мощностей $N_g = (5+300)$ Вт постоянные времени T_A и T_g имеют значения $T_g \approx (0,02 \div 0,10)$ с, $T_A \approx (0,002 \div 0,008)$ с. Откуда, если в среднем считать, что $T_A \approx 0,1 T_g$, то корни

$$x_1, x_2 = -\frac{1}{2T_A} \pm \frac{1}{2T_A} \sqrt{1 - \frac{0,4 T_A}{T_g}} = -\frac{5}{T_g} \pm \frac{3,85}{T_g}; \quad \text{или}$$

$$x_1 = -\frac{1,15}{T_g}; \quad x_2 = -\frac{8,85}{T_g};$$

если положить в худшем случае $T_g = 0,1$ с, то $x_1 = -11,5 \frac{1}{с}$, $x_2 = -88,5 \frac{1}{с}$. С другой стороны, если пренебречь в уравнении (I.8) членом $T_g T_A D^2$, то остается $(T_g D + 1) = 0$ и

$x = -\frac{1}{T_g} \approx -10 \frac{1}{с}$, т.е. переходный процесс по скорости ω_g в двигателе определяется в основном величиной электромеханической постоянной времени T_g , а влиянием индуктивности якоря практически можно пренебречь. В этом случае исходные уравнения движения управляемого через якорь двигателя [уравнения (I.5)] будут

$$\begin{aligned} R_A i_A + K_E \omega_g &= U_1, \\ -K_i i_A + T_g D \omega_g &= -M_H. \end{aligned} \quad (I.9)$$

Далее, полагая $U_1 = const$, $M_H = const$, получим для установившегося режима работы двигателя ($D \omega_g = 0$)

$$i_A = \frac{M_H}{K_i}, \quad \frac{M_H R_A}{K_i} + K_E \omega_g = U_1,$$

или

$$M_H = K \cdot \frac{U_1}{D} - \frac{K_i K_E}{D} \omega_g, \quad (I.10)$$

уравнение механических характеристик двигателя, представляющих семейство параллельных наклонных прямых в функции нагрузки M_H , угловой скорости ω_g якоря и управляющего напряжения U_1 на якоре (рис. I.4).

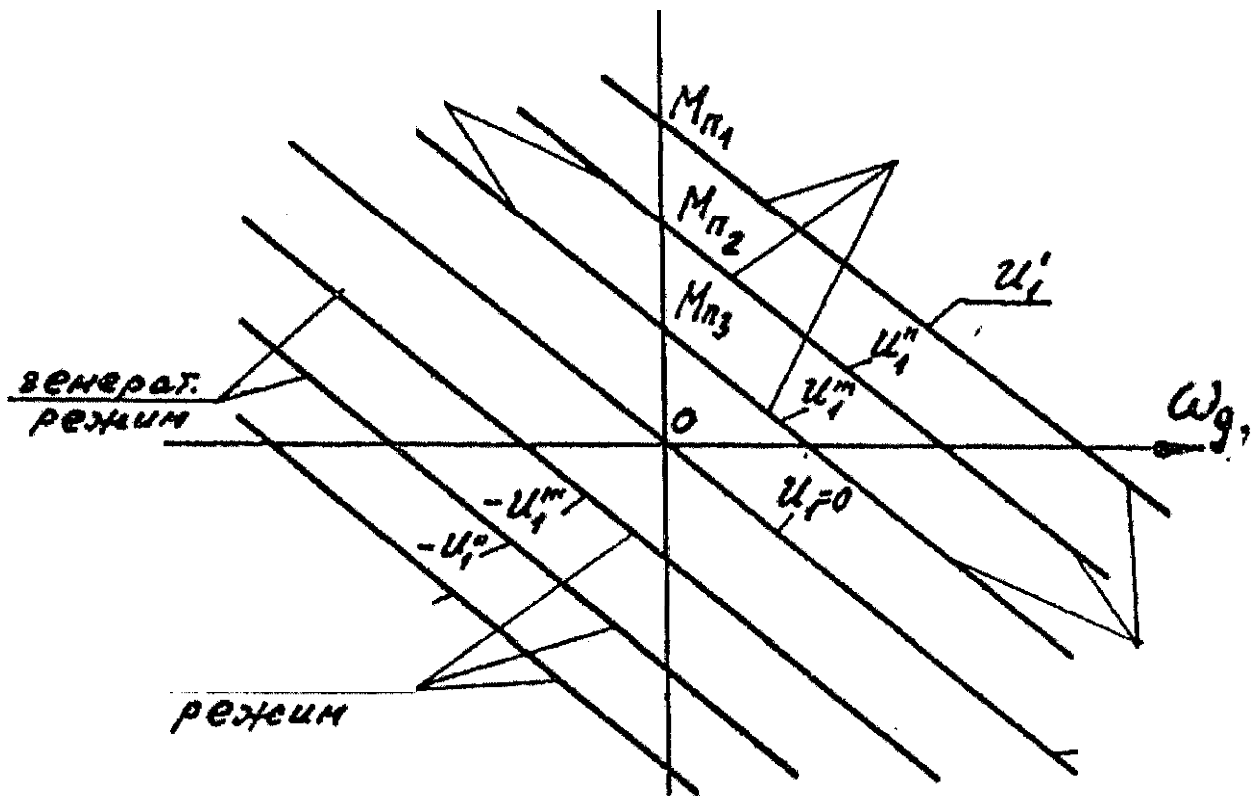


Рис. I.4. Определение механических характеристик двигателя

Из анализа механических характеристик двигателя следует:

1) при $M_H = 0$ (нагрузка отсутствует) и при постоянном напряжении $U_1 = const$ имеем

$$\omega_{yхх} = \frac{U_1}{K_2} \quad (I.11)$$

так называемую скорость холостого хода двигателя. Отсюда следует, что в данном случае вращающий момент двигателя ($K_1 \frac{U_1}{K_2}$) уравновешивается моментом от противо-э.д.с., возникающей в результате вращения якоря в поле возбуждения двигателя;

2) если при том же $U_1 = const$, $\omega_g = 0$, то момент нагрузки $M_H = K_1 \frac{U_1}{R_A}$ — уравновешивается моментом двигателя (тормозной режим двигателя);

3) при всех промежуточных значениях внешней нагрузки M_H при том же значении $U_1 = const$ двигатель, преодолевая нагрузку, вращает якорь со скоростью $\omega_g = \frac{U_1}{K_2} - \frac{M_H R_A}{K_1 K_2}$. Из последней формулы видно, что в этом случае по абсолютному значению противо-э.д.с. двигателя меньше напряжения U_1 на

якоря и по знаку противоположна. Таким образом, семейство прямых в первом квадранте графика механических характеристик представляет активный двигательный режим работы двигателя. Равным образом в случае изменения знака внешней нагрузки ($M_H < 0$) и знака управляющего напряжения ($U_1 < 0$) семейство механических характеристик располагается в третьем квадранте графика и представляет тоже двигательный режим работы;

4) другие два квадранта — второй и третий — графика семейства механических характеристик двигателя определяют режимы торможения движения двигателя. Так, например, если при некотором постоянном положительном напряжении $U_1 > 0$ двигатель находится в состоянии статического равновесия с нагрузкой, т.е.

$M_{HO} = k_i \frac{U_1}{R_A}$ и, следовательно, $\omega_g = 0$, а в некоторый момент времени нагрузка получает положительное приращение $\Delta M_H > 0$, то она, преодолевая пусковой (статический) момент двигателя M_{HO} , вращает якорь двигателя со скоростью $\omega_g < 0$, т.е. в этом случае возникает противо-э.д.с. якоря, по знаку такая же как и управляющее напряжение U_1 . Следовательно, ток якоря определяется суммой напряжений $U_1 + E_g$. Это так называемый тормозной режим противовключения (семейство прямых в верхней части II квадранта). Другой случай может быть, когда двигатель без нагрузки ($M_H = 0$) при некотором напряжении U_1 в установившемся режиме имел скорость холостого хода $\omega_{gxx} = \frac{U_1}{k_E}$. В некоторый момент времени возникает внешний момент нагрузки по знаку, совпадающий с напряжением вращения якоря. При этом скорость вращения якоря становится большей, чем скорость ω_{gxx} холостого хода двигателя и, следовательно, противо-э.д.с. якоря по абсолютному значению больше, чем напряжение U_1 на якоре, так как ток якоря изменяет свое направление и двигатель обращается в генератор (так называемый генераторный режим). Отсюда следует, что наибольшую механическую мощность двигателя можно ожидать в чисто двигательном режиме. Формулу (I.10) семейства механических характеристик двигателя можно представить как

$$M_H = M_{HO} - M_{HO} \frac{\omega_g}{\omega_{gxx}}, \quad (I.12)$$

где $M_{HO} = k_i \frac{U_1}{R_A}$ — пусковой момент двигателя;

$$\frac{M_{HO}}{\omega_{gxx}} = k_i \frac{U_1}{R_A} \cdot \frac{k_E}{U_1} = \frac{k_i k_E}{R_A} = \operatorname{tg} \alpha \quad (I.13)$$

характеризует наклон механических характеристик и называется жесткостью механической характеристики двигателя.

Из выражения электромеханической постоянной времени двигателя $T_g = \frac{J_g R_g}{K_i K_E}$ следует, что чем больше жесткость механической характеристики двигателя, тем выше быстродействие (меньше T_g) двигателя.

Механическая мощность, развиваемая двигателем,

$$N_g = M_g \omega_g = K_i \frac{U_1}{R_g} \omega_g - \frac{K_i K_E}{R_g} \omega_g^2 \quad (I.14)$$

или на основании (I.12)

$$N_g = M_{\pi} \omega_g - \frac{M_{\pi}}{\omega_{g\text{нн}}} \omega_g^2 \quad (I.15)$$

Если $\omega_g = 0$ или $\omega_g = \omega_{g\text{нн}}$, то $N_g = 0$, что естественно.

Максимальная отдаваемая в нагрузку мощность двигателя определится из условия

$\frac{\partial N_g}{\partial \omega_g} = M_{\pi} - 2 \frac{M_{\pi}}{\omega_{g\text{нн}}} \omega_g = 0$, откуда

$\omega_{g\text{н}} = \frac{\omega_{g\text{нн}}}{2}$ - номинальная угловая скорость двигателя и $M_{g\text{н}} = \frac{M_{\pi}}{2}$ - номинальный момент двигателя.

Итак,

$$N_{g\text{max}} = M_{g\text{н}} \omega_{g\text{н}} \quad (I.16)$$

График механической мощности двигателя, работающего в двигательном режиме при постоянном напряжении $U_1 = \text{const}$, представляется в виде параболы (I.15) (рис. I.5).

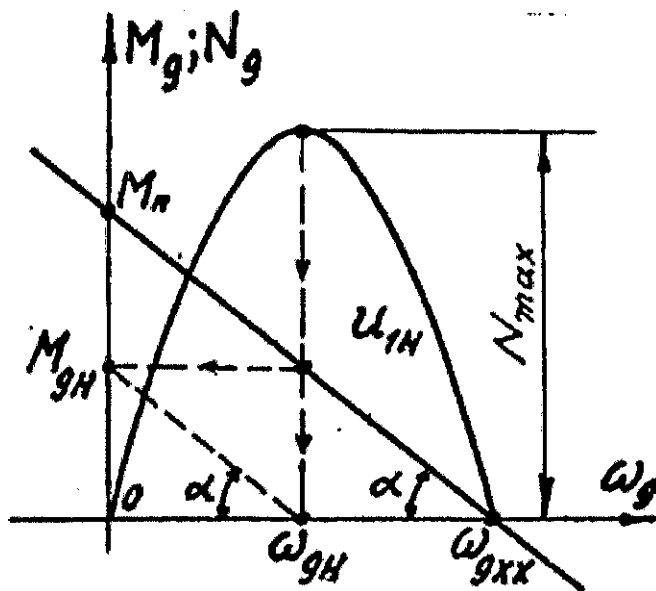


Рис. I.5. Определение механической мощности двигателя. Номинальный режим

§ 2. Рулевая машина с нагрузкой от руля ЛА

Рассмотрим теперь двигатель в составе рулевой машины, присоединенной к системе управления рулем летательного аппарата (рис. I.6). Введем следующие обозначения:

ω_c - угловая скорость выходного вала рулевой машины, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,
 ω_g - угловая скорость якоря двигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,

- $\dot{\delta}_p$ - угловая скорость руля, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$,
 J_d - момент инерции якоря двигателя относительно оси якоря;
 J_n - момент инерции редуктора, приведенный к оси якоря двигателя;
 J_p - момент инерции руля ЛА относительно его оси вращения (шарнира);
 $V = \frac{\omega_d}{\omega_c}$ - передаточное отношение редуктора, равное отношению угловой скорости якоря двигателя к угловой скорости выходного вала рулевой машины;
 $k_p = \frac{\omega_c}{\delta_p}$ - передаточное отношение угловой скорости выходного вала рулевой машины к угловой скорости отклонения руля;
 J_c - момент инерции всех подвижных элементов передачи, приведенный к выходному валу рулевой машины.

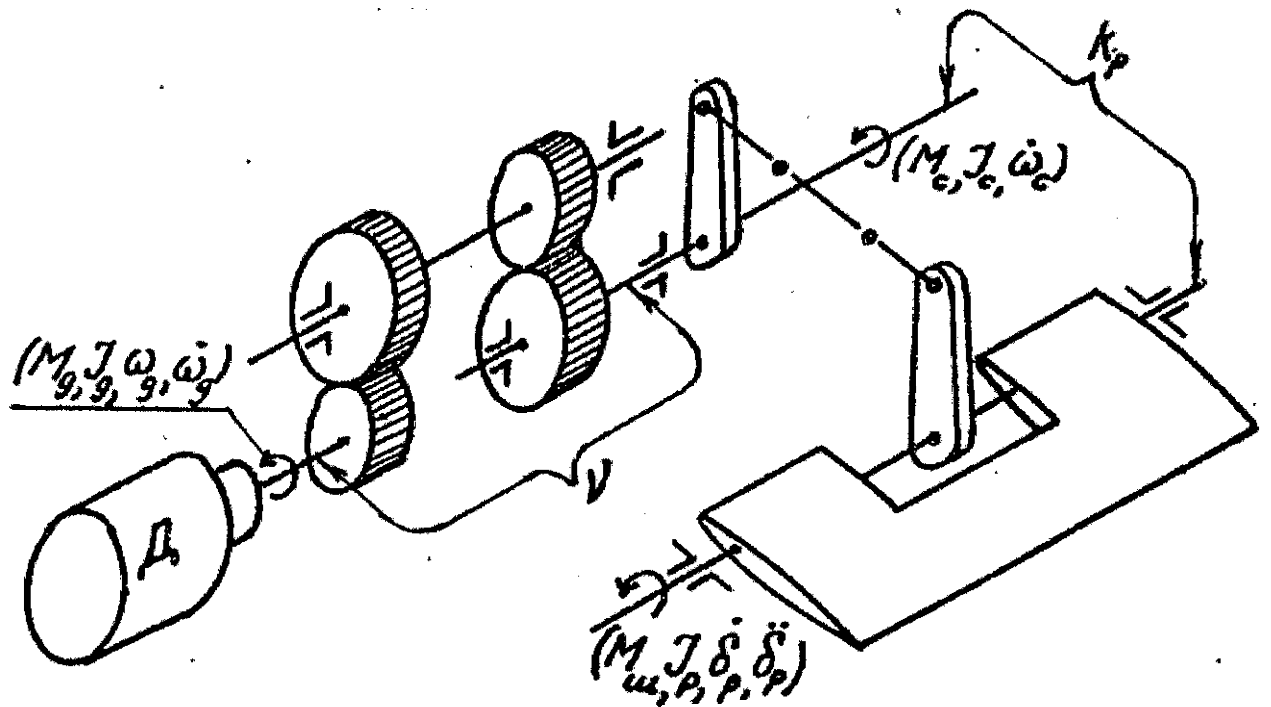


Рис. 1.6. Рулевая машина в системе управления рулем ЛА
 Механическое уравнение движения рулевой машины с нагрузкой от руля

$$J_c \ddot{\omega}_c = V M_d - \frac{M_{ш}}{k_p}, \quad (I.17)$$

где $J_c = (J_d + J_n) V^2 + \frac{J_p}{k_p^2}$;

M_d - момент двигателя на оси якоря;

$M_{ш}$ - шарнирный момент руля (момент аэродинамической нагрузки);

$\ddot{\omega}_c$ - угловое ускорение выходного вала рулевой машины.

Как было показано ранее, постоянной времени $T_p = \frac{L_p}{R_p}$ с

в уравнениях движения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно пренебречь и представить уравнение баланса э.д.с. на обмотке якоря

$$U_1 = i_a R_a + K_E \omega_g \quad (1.18)$$

Представляя момент двигателя $M_g = K_i i_a$ и $\omega_g = \omega_c \nu$, получим из уравнений (1.17) и (1.18) систему уравнений движения рулевой машины под нагрузкой руля

$$\begin{aligned} R_a i_a + K_E \nu \omega_c &= U_1, \\ -K_i \nu i_a + J_c D \omega_c &= -\frac{M_{ш}}{K_p}. \end{aligned} \quad (1.19)$$

Исключая в уравнениях (1.19) ток i_a якоря, получаем уравнение движения выходного вала рулевой машины

$$(J_c D + \frac{K_i K_E \nu^2}{R_a}) \omega_c = K_i \nu \frac{U_1}{R_a} - \frac{M_{ш}}{K_p}, \quad (1.20)$$

где $K_i \nu \frac{U_1}{R_a}$ - пусковой момент двигателя рулевой машины, приведенный к ее выходному валу;

$f = \frac{K_i K_E}{R_a}$ - коэффициент собственного демпфирования двигателя, или жесткость механической характеристики двигателя.

Если обозначить $T_{PM} = \frac{J_c R_a}{K_i K_E \nu^2}$ - электромеханическую постоянную времени рулевой машины с инерционной нагрузкой от руля, то уравнение (1.20) можно представить

$$(T_{PM} D + 1) \omega_c = \frac{U_c}{K_E \nu} - \frac{R_a M_{ш}}{K_i K_E \nu^2}. \quad (1.21)$$

Постоянную времени T_{PM} рулевой машины можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} T_{PM} &= \frac{J_c R_a}{K_i K_E \nu^2} = \frac{(J_g \nu^2 + J_n \nu^2 + \frac{J_p}{K_p^2}) R_a}{K_i K_E \nu^2} = \\ &= \frac{J_g R_a}{K_i K_E} + \frac{J_n R_a}{K_i K_E} + \frac{J_p R_a}{K_i K_E K_p^2 \nu^2} = T_g + T_p + T_H, \end{aligned}$$

где T_g - электромеханическая постоянная времени двигателя; T_p - дополнительная постоянная времени от инерции редуктора;

T_H - постоянная времени от инерционной нагрузки руля.

Как следует из структуры постоянной времени T_{PM} рулевой машины, редуктор и руль вместе с проводкой управления могут существенно влиять на динамические характеристики рулевой машины.

В операторной форме Лапласа уравнение (1.21) представим в виде

$$(T_{PM}p+1)\omega_c = \frac{u_1(p)}{K_E V} - \frac{R_a M_{ш}(p)}{K_i K_E V^2} \quad (I.22)$$

или без учета шарнирного момента руля

$$(T_{PM}p+1)\omega_c = \frac{u_1(p)}{K_E V}, \quad (I.23)$$

и передаточная функция рулевой машины (с учетом только инерционной нагрузки)

$$W_{PM}(p) = \frac{\omega_c(p)}{u_1(p)} = \frac{\frac{1}{K_E V}}{T_{PM}p+1}. \quad (I.24)$$

Структурная схема рулевого привода представлена в общем случае на рис. I.7, где $W_K(p)$ - передаточная функция корректирующего контура в прямой цепи канала; $W_{oc}(p)$ - передаточная функция цепи обратной связи; K_y - коэффициент усиления усилителя - преобразователя мощности; φ - угол поворота выходного вала рулевой машины.

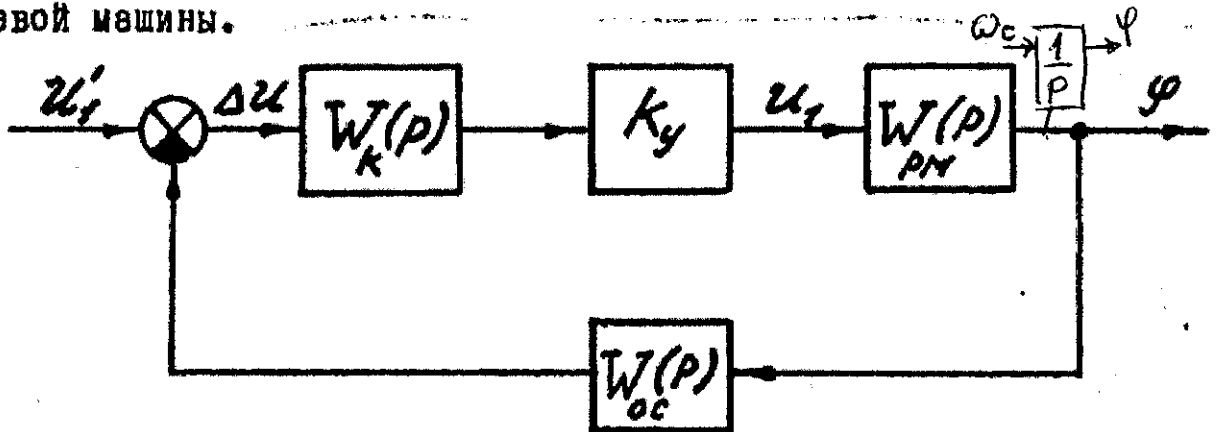


Рис. I.7. Определение характеристик рулевого привода

Согласно схеме (рис. I.7) передаточная функция рулевого привода

$$W_{PM}(p) = \frac{\frac{K_y}{K_E V} \cdot W_K(p)}{T_{PM}p^2 + p + \frac{K_y}{K_E V} \cdot W_K(p) \cdot W_{oc}(p)} \quad (I.25)$$

В рулевых приводах с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением часто используется коррекция только через цепь обратной связи. Обычно это выполняется в виде комбинации жесткой и скоростной обратных связей.

В этом случае $W_K(p) = 1$, $W_{oc}(p) = K_{oc} + K_T p$, и передаточная функция рулевого привода имеет вид

$$W_{PM}(p) = \frac{\frac{1}{K_{oc}}}{\frac{T_{PM} K_E V}{K_y K_{oc}} p^2 + \frac{V K_E + K_y K_T}{K_y K_{oc}} p + 1}, \quad (I.26)$$

где K_{oc} - коэффициент усиления жесткой обратной связи;
 K_r - коэффициент усиления скоростной обратной связи.

Обозначаем

$$T_o^2 = \frac{T_{PM} K_E V}{K_y K_{oc}}, \quad (I.27)$$

$$T_a = \frac{V K_E + K_y K_r}{K_y K_{oc}}. \quad (I.28)$$

Передаточная функция рулевого привода в этом случае будет

$$W_{PI}(p) = \frac{\frac{1}{K_{oc}}}{T_o^2 p^2 + T_a p + 1}, \quad (I.29)$$

в соотношении

$$\frac{T_o^2}{T_a} = \frac{T_{PM}}{1 + \frac{K_y K_r}{K_E V}}. \quad (I.30)$$

Как видно из (I.28), введение скоростной обратной связи позволяет выбирать желаемое демпфирование в рулевом приводе и в определенной степени влиять на соотношение $\frac{T_o^2}{T_a}$.

В частном случае, когда имеет место только жесткая обратная связь ($K_r = 0$),

$$\frac{T_o^2}{T_a} = T_{PM}, \quad (I.31)$$

где $T_a = \frac{K_E V}{K_y K_{oc}}$.

Представим передаточную функцию (I.29) рулевого привода как

$$W_{PI}(p) = \frac{\frac{1}{K_{oc}}}{T_o^2 p^2 + 2\xi T_o p + 1}, \quad (I.32)$$

тогда $2\xi T_o = T_a$ и согласно формулам (I.27) и (I.28) относительный коэффициент демпфирования рулевого привода

$$\xi = \frac{V K_E + K_y K_r}{2 \cdot V \sqrt{T_{PM} \cdot K_E \cdot K_y \cdot K_{oc}}}, \quad (I.33)$$

в частном случае при $K_r = 0$,

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_E V}{T_{PM} \cdot K_y \cdot K_{oc}}}. \quad (I.34)$$

Так как постоянная времени T_{PM} может быть представлена как

$$T_{PM} = \frac{J'_g R_g}{K_i K_E} \left(1 + \frac{\rho}{K_p^2 V^2} \right), \quad (I.35)$$

где $J'_g = J_g + J_n$ - суммарный момент инерции якоря и приведенный

момент инерции редуктора к оси якоря; $\ell = \frac{J_p}{J_0}$, то из формулы (I.35) следует, что чем больше жесткость $(\frac{k_k k_e}{R_a})$ механической характеристики двигателя, тем меньше постоянная времени T_{pm} рулевой машины при прочих неизменных параметрах. Отсюда также следует, что с уменьшением постоянной времени T_{pm} повышается демпфирование в рулевом приводе.

Под передаточным отношением V понимается его оптимальное значение V_0 , определяемое из условия минимального потребного момента двигателя при заданной нагрузке и заданном максимальном ускорении руля (выходного вала рулевой машины).

Так как $\varphi = K_p \delta_p$, то передаточная функция рулевого привода автопилота имеет вид

$$W_{pp}(p) = \frac{\delta_p(p)}{u_y(p)} = \frac{1}{T_0^2 p^2 + T_a p + 1} \cdot \frac{1}{K_{oc} K_p}, \quad (I.36)$$

где $\delta_p(p)$ — изображение отклонения руля;

$u_y(p)$ — изображение функции управляющего сигнала автопилота, поступающего на рулевой привод.

Следовательно, уравнение канала автопилота имеет вид

$$(T_0^2 D^2 + T_a D + 1) \delta_p = \frac{u_y(t)}{K_{oc} K_p}. \quad (I.37)$$

При выполнении синтеза структурной схемы автопилота и расчета его параметров (передаточных чисел, характеристик фильтров, входящих в состав управляющей функции $u_y(t)$) определяются требуемые значения T_0 и T_a рулевого привода, а по ним и значение T_{pm} .

ГЛАВА 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ, СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ РУЛЕВОЙ МАШИНЫ

Расчетные работы по определению мощности двигателя и его статических и динамических характеристик как исходных требований для разработки конструкции двигателя, и определение оптимального передаточного отношения V_0 редуктора рулевой машины выполняются после синтеза структурной схемы автопилота и его каналов, расчета параметров структурной схемы каналов.

Исходными данными для расчета мощности двигателя и его основных электрических и механических характеристик, а также для расчета передаточного отношения V_0 редуктора являются переходные функции органов управления ЛА, по которым определяются шарнирные и инерционные моменты рулей, являющиеся ос-

новой нагрузкой на рулевом приводе.

По заданным функциям переходного процесса ЛА определяются переходные функции рулей ЛА и параметры рулевого привода T_0 и T_a согласно уравнению (1.37). Из всего множества возможных переходных процессов руля (при различных характерных начальных условиях и внешних возмущениях, действующих на ЛА) выбираются наиболее неблагоприятные в отношении максимальной нагрузки на руле, по которым определяются переходные функции по угловой скорости $\dot{\delta}_p$ отклонения руля и угловому ускорению $\ddot{\delta}_p$ руля.

Прежде всего вычисляется и строится графически функция внешней нагрузки на руле (рис. 2.1а)

$$M_H = M_{Hш} + M_{Hи} \quad (2.1)$$

где $M_{Hш} = q S P_p [m_{ш}^\alpha \alpha(t) + m_{ш}^\delta \delta_p(t)]$ - шарнирный (аэродинамический) момент руля;

$M_{Hи} = J_p \ddot{\delta}_p$ - инерционный момент руля;

q - скоростной напор в зоне руля;

S_p - площадь руля;

b_p - хорда руля;

$m_{ш}^\alpha, m_{ш}^\delta$ - коэффициенты шарнирного момента руля;

$\alpha(t)$ - переходная функция угла атаки;

$\delta_p(t)$ - переходная функция руля.

Далее проводится графическое построение переходных функций $\delta_p(t)$, $\dot{\delta}_p(t)$ и $\ddot{\delta}_p(t)$ (рис. 2.1б). По переходным функциям $M_H(t)$ и $\ddot{\delta}_p(t)$ определяется максимальное значение потребной мощности для преодоления нагрузки на руле и выполнения заданного переходного процесса руля $\delta_p(t)$:

$$N_p = M_H(t) \cdot \dot{\delta}_p(t) \quad (2.2)$$

На рис. 2.1б представлен график распределения потребной мощности на руле во время переходного процесса. По значению максимальной мощности N_{pmax} определяется (по нормальям или каталогу) аналог двигателя рулевой машины, для которого и выбирается численное значение момента инерции $J_{я}$ якоря проектируемого двигателя. Это численное значение $J_{я}$ далее используется для расчета оптимального передаточного отношения редуктора рулевой машины.

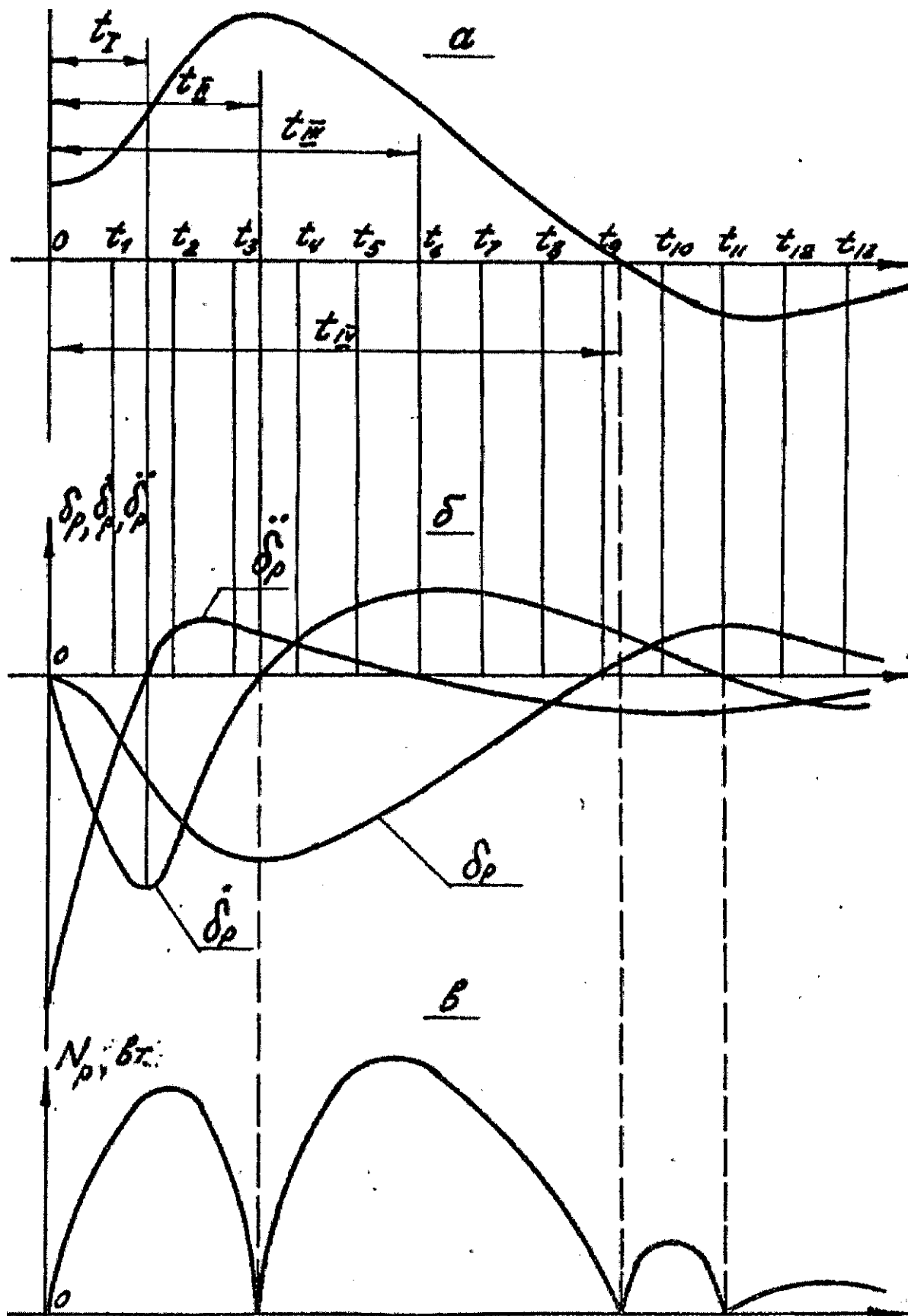


Рис. 2.1. Графики переходных функций внешней нагрузки движения руля и развиваемой мощности на руле

§ I. Определение передаточного отношения редуктора

рулевой машины

Механическое уравнение движения рулевой машины (I.17) имеет вид $J_c \dot{\omega}_c = \nu M_g - \frac{M_{ш}}{k_p}$, где $J_c = (J_g + J_n) \nu^2 + \frac{J_p}{k_p^2}$.

Обозначим $M_c = \frac{M_{ш}}{k_p}$ - шарнирный момент руля, приведенный к выходному валу рулевой машины; $J_c' = \frac{J_p}{k_p^2}$ - момент инерции руля, приведенный к выходному валу рулевой машины; $J_g' = J_g + J_n$; η - коэффициент полезного действия редуктора и уравнение (I.17) представим в виде

$$(J_g' \nu^2 \eta + J_c') \dot{\omega}_c = M_g \nu \eta - M_c. \quad (2.3)$$

Предположим, что внешний момент M_c нагрузки на рулевой машине величина постоянная ($M_c = const$), задано требуемое ускорение $\dot{\omega}_c$ выходного вала рулевой машины и моменты инерции J_g' и J_c' - известны. Требуется определить минимальный момент двигателя при заданных нагрузках, обеспечивающий быстродействие машины, характеризуемое заданным $\dot{\omega}_c$.

Из уравнения (2.3)

$$M_g = \frac{M_c}{\eta \nu} + \frac{(J_g' \nu^2 \eta + J_c') \dot{\omega}_c}{\eta \nu}. \quad (2.4)$$

Определяя экстремум момента M_g двигателя в зависимости от ν редуктора, получим $\frac{\partial M_g}{\partial \nu} = 0$

или

$$\left(\frac{\partial M_g}{\partial \nu} \right)_{\nu=\nu_0} = -\frac{M_c}{\eta \nu_0^2} + J_g' \dot{\omega}_c - \frac{J_c' \dot{\omega}_c}{\eta \nu_0^2} = 0. \quad (2.4')$$

Отсюда получаем

$$\nu_0 = \sqrt{\frac{M_c + J_c' \dot{\omega}_c}{\eta J_g' \dot{\omega}_c}}. \quad (2.5)$$

Из (2.4') следует, что при $\nu < \nu_0$ производная $\frac{\partial M_g}{\partial \nu} < 0$, а при $\nu > \nu_0$ производная $\frac{\partial M_g}{\partial \nu} > 0$ при заданном $\dot{\omega}_c$, т.е. существует минимум потребного момента M_g двигателя, определяемый значением передаточного отношения ν_0 . Оптимальное значение момента $M_{g \text{ опт.}}$ равно

$$M_{g \text{ опт.}} = \frac{M_c}{\eta \nu_0} + \frac{(J_c' + J_g' \nu_0^2 \eta) \dot{\omega}_c}{\eta \nu_0}. \quad (2.6)$$

Из условия (2.4') также следует, что

$$J_g' \dot{\omega}_c \nu_0 = \frac{M_c + J_c' \dot{\omega}_c}{\eta \nu_0} \quad (2.7)$$

или $J'_g \dot{\omega}_g = \frac{M_c + J'_c \cdot \dot{\omega}_c}{\eta V}$, т.е. половина оптимального значения момента $M_{g \text{ опт.}}$ двигателя при заданном $\dot{\omega}_c$ затрачивается на преодоление собственной инерции двигателя и редуктора рулевой машины, а другая половина момента — на преодоление внешней нагрузки от руля (шарнирного и инерционного моментов руля) (рис. 2.2).

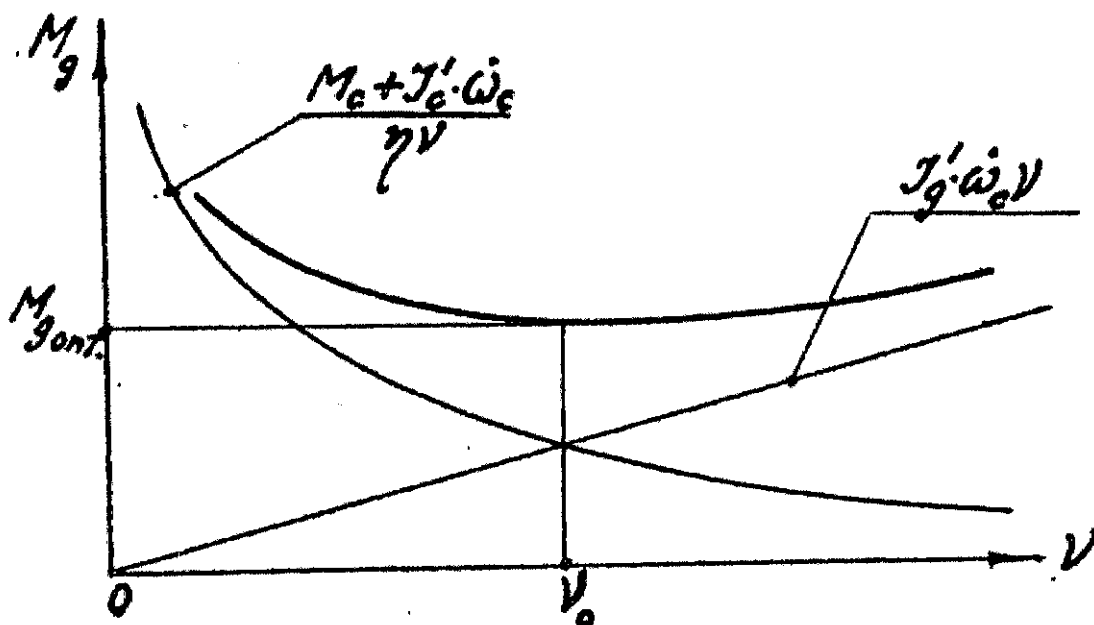


Рис. 2.2. Определение оптимального V_0 .

Из формулы (2.5) и графика (рис. 2.2) можно заключить, что при малых потребных значениях углового ускорения $\dot{\omega}_c$ рулевой машины (руля) оптимальное значение передаточного отношения V_0 редуктора возрастает. Однако в этом случае некоторые отступления в выборе передаточного отношения V редуктора от оптимального его значения V_0 не сильно изменяют величину потребного момента двигателя M_g от его оптимального значения. В этом случае, когда при том же моменте M_c нагрузки требуется большое быстроедействие (большое $\dot{\omega}_c$), а это имеет место при большом J'_c и коротком по времени переходном процессе, может оказаться, что изменение передаточного отношения V редуктора относительно его оптимального значения V_0 будет критичным для величины потребного момента двигателя (рис. 2.3). Однако и в этом случае отклонение V от оптимального значения V_0 практически допустимо в пределах 10%, что не сильно превышает расчетное значение потребного момента двигателя. В действительности внешняя нагрузка и инерционный момент рулевой машины являются переменными во времени и определяются движением руля (потребным переходным процессом). В этом реальном случае аналитическое определение оптимального передаточного отношения V_0

редуктора затруднительно. Как видно, его значение для каждой мгновенной нагрузки на двигателе будет (для каждого момента времени) локальным.

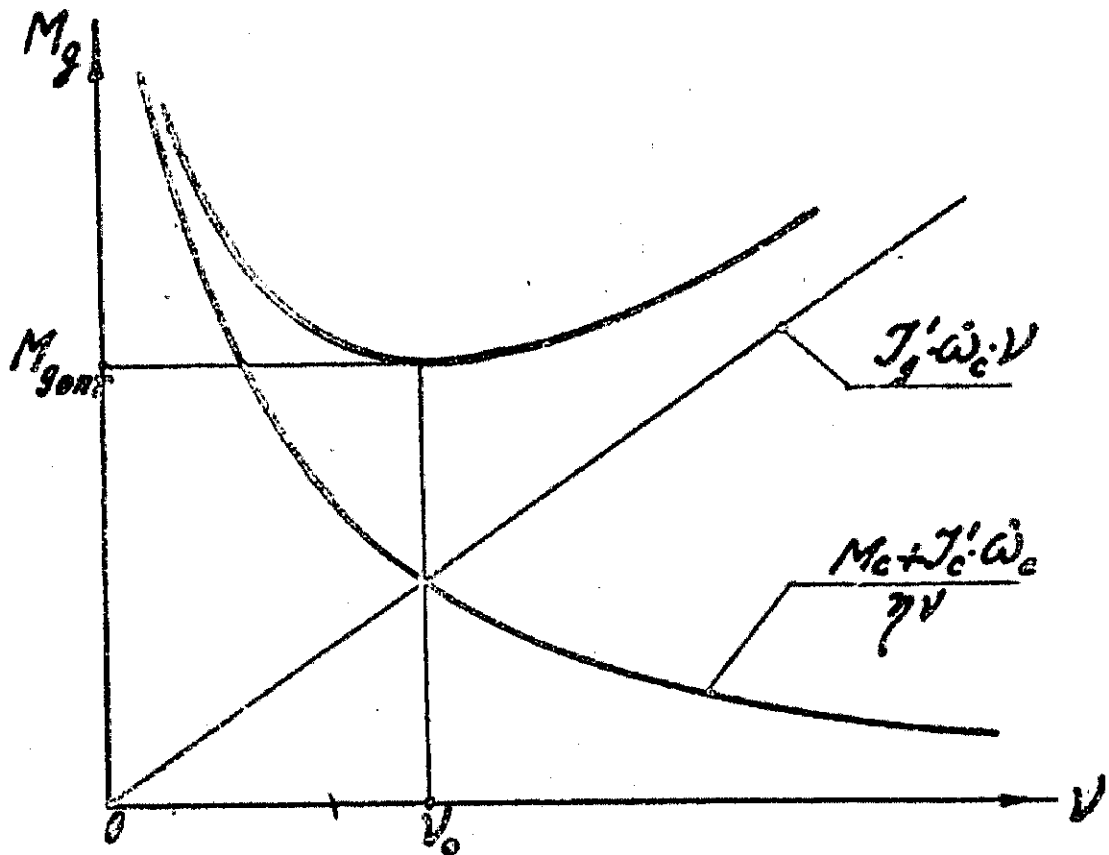


Рис. 2.3. Определение V_0 при больших J_c' и ω_c .

Практически наиболее просто и достоверно определять оптимальное передаточное отношение V_0 редуктора из анализа построенных графиков функций $M_H(t)$, $\delta_r(t)$, $\dot{\delta}_r(t)$ и $\ddot{\delta}_r(t)$ (см. рис. 2.1). Прежде всего заметим, что формула (2.5) для определения передаточного отношения V_0 справедлива, когда вся нагрузка на двигателе однозначна. Только в этом случае и существует экстремальное значение — минимум требуемого момента двигателя, определяемый при этих условиях передаточным отношением V_0 . Это означает, что при этих условиях имеет место чисто двигательный режим работы рулевой машины, т.е. вся механическая энергия двигателя идет на преодоление полной нагрузки (шарнирного момента и всей инерционной нагрузки). На графиках (рис. 2.1) переходных функций внешней нагрузки $M_H(t)$ и движения руля $\delta_r(t)$, $\dot{\delta}_r(t)$, $\ddot{\delta}_r(t)$ выделяются участки чисто двигательного режима работы двигателя. Из графиков следует, что в начальный момент времени $t=0$ двигатель рулевой машины, получая сигнал управления, начинает движение из состояния покоя с максимальным ускорением руля $\ddot{\delta}_r \max$ и на участке времени $0-t_r$ он преодолевает нагрузку в виде суммы позиционного момента (шарнирного)

руля и полного инерционного момента сопротивления.

В конце участка t_I руль получает необходимую максимальную угловую скорость $\dot{\delta}_{p\max}$, продолжая движение в том же направлении. Начиная с момента времени t_I руль продолжает движение в том же направлении, что и на участке времени $0-t_I$, но с замедлением, т.е. инерционный момент на руле (а следовательно, и на двигателе) изменяет знак на обратный и становится противоположным по знаку шарнирному моменту руля, который по мере отклонения руля продолжает нарастать по абсолютному значению до момента времени t_{II} , где движение руля (двигателя) изменяет направление.

Таким образом, на отрезке времени $0-t_I$ имеет место чисто двигательный режим работы рулевой машины. На участке t_I-t_{II} инерционный момент противоположен по знаку шарнирному моменту руля, и в зависимости от абсолютного соотношения этих моментов режим работы рулевой машины может быть как двигательным (при $|M_{\text{ин}}| > |M_{\text{ш}}|$), так и тормозным (при $|M_{\text{ин}}| < |M_{\text{ш}}|$). На участке $t_{II}-t_{III}$, где изменяется знак скорости $\dot{\delta}_p$ руля, а нагрузка на руле остается такой же, имеет место генераторно-тормозной режим работы двигателя. Так как переходный процесс руля быстротухающий, то естественно, что максимальная мощность и максимальная нагрузка на рулевой машине проявляются в начале переходного процесса. В этой же области имеет место и наиболее тяжелый двигательный режим работы рулевой машины и ее двигателя.

На участке чисто двигательного режима, выделяя для различных моментов времени значения внешней нагрузки

$$M_{\text{ш}i}(t_i) = k_p [M_{\text{с}i}(t_i) + J_{\text{с}} \ddot{\omega}_{\text{с}i}(t_i)] \quad (2.8)$$

и соответствующие этим моментам времени t_i угловые ускорения руля $\ddot{\delta}_{pi}$, получим среднее значение внешней нагрузки

$$M_{\text{шср}} = \frac{M_{\text{ш}1} + M_{\text{ш}2} + \dots + M_{\text{ш}i}}{i} \quad (2.9)$$

и среднее значение углового ускорения выходного вала рулевой машины

$$\ddot{\omega}_{\text{ср}} = \frac{k_{\text{с}} (\ddot{\delta}_{p1} + \ddot{\delta}_{p2} + \dots + \ddot{\delta}_{pi})}{i} \quad (2.10)$$

Для начальной фазы переходного процесса руля (чисто двигательный режим), по которому определяется оптимальное значение передаточного отношения V_0 редуктора рулевой машины,

$$V_0 = \sqrt{\frac{M_{нсп}}{K_p \eta J_g' \dot{\omega}_{сп}}} \quad (2.11)$$

§ 2. Определение мощности и потребных статических и динамических характеристик двигателя

После определения передаточного отношения V_0 редуктора рулевой машины вычисляется и строится графически полная нагрузочная характеристика в координатах $(M_{но}, \dot{\delta}_p)$, по которой определяется так называемая предельная нагрузочная характеристика (рис. 2.4).

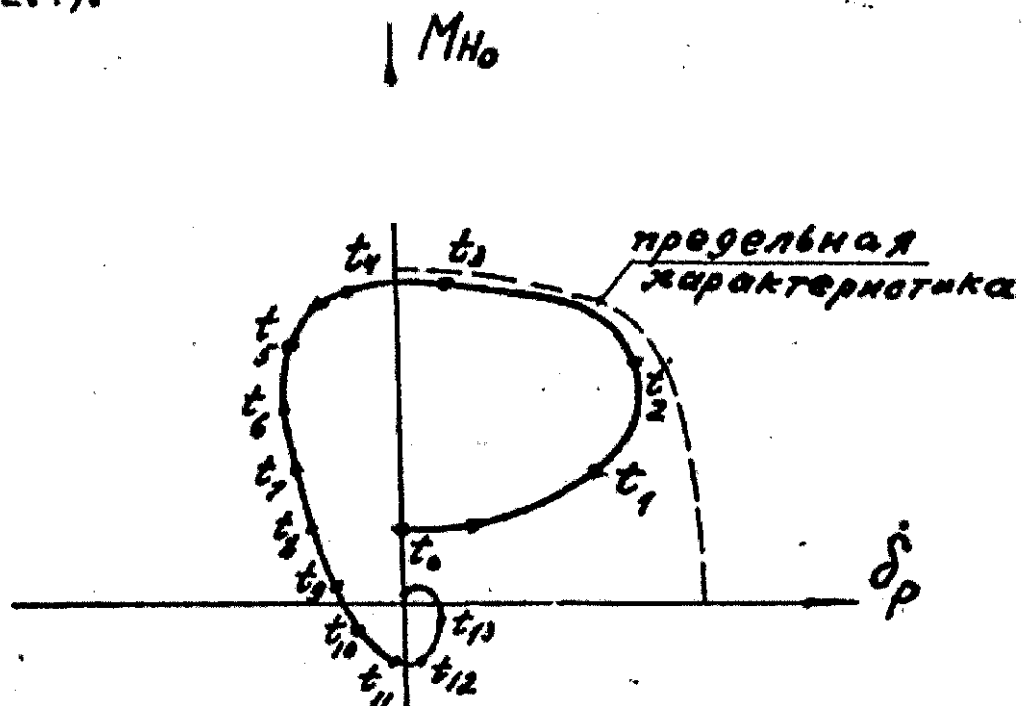


Рис. 2.4. Полная нагрузочная и предельная характеристики рулевого привода

Полная нагрузочная характеристика двигателя рулевой машины, приведенная к рулю ЛА, имеет следующий вид:

$$M_{но} = q S_p B_p [m_{ш}^{\alpha} \alpha(t) + m_{ш}^{\delta} \delta_p(t)] - J_p \ddot{\delta}_p - \eta V_0^2 K_p^2 J_g' \ddot{\delta}_p, \quad (2.12)$$

$$\dot{\delta}_p = \dot{\delta}_p(t).$$

Передаточное отношение V_0 редуктора, определенное по формуле (2.11), реализуется по оптимальной схеме (см. гл. 4) из условия получения минимальной величины момента инерции J_n редуктора, приведенного к валу якоря двигателя. Этим достигается возможность получения минимального значения $J_g' = J_g + J_n$. Для

цикла переходного процесса руля в координатах $(M_{но}, \delta_p)$ строится полная нагрузочная характеристика (2.12) (рис. 2.4). Очевидно, если двигатель рулевой машины автопилота будет иметь в точности такую же механическую характеристику (приведенную к рулю), то он в состоянии выполнить заданный переходный процесс (режим работы) с нагрузкой, определяемой системой (2.12). На рис. 2.5 приведены примеры предельных (оггибающих) нагрузочных характеристик I, II, III и IV.

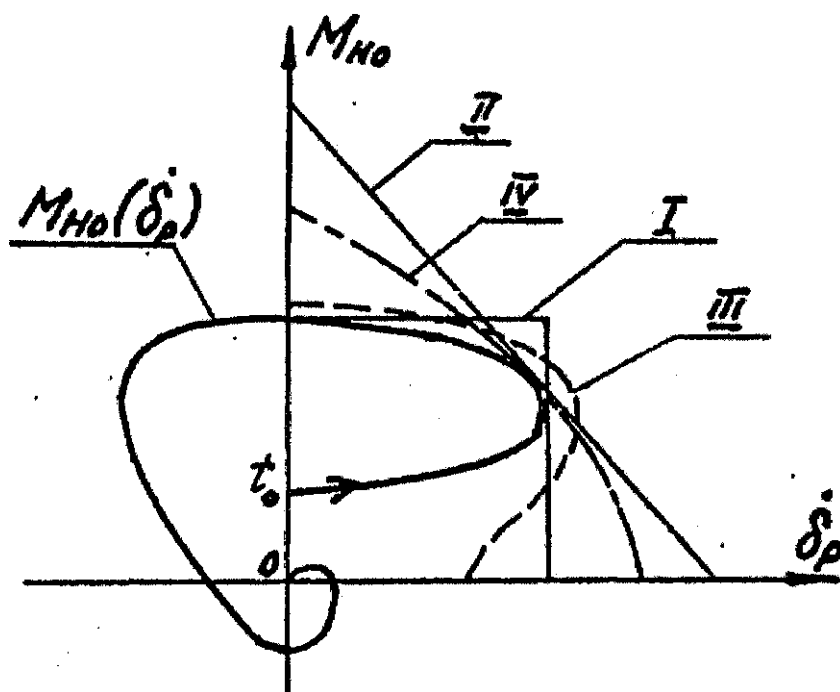


Рис. 2.5. Примеры предельных нагрузочных характеристик

Предельная нагрузочная характеристика прямоугольного типа I по форме представляет идеализированную механическую характеристику управляемой магнитно-порошковой муфты. Предельная нагрузочная характеристика II в виде наклонной прямой характерна для механической характеристики электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Характеристика III имеет вид, близкий к механической характеристике трехфазного двигателя переменного тока, и, наконец, характеристика IV по своему виду близка к механической характеристике двухфазного двигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором и амплитудным управлением, а также к механической характеристике гидравлического или электрогидравлического двигателя поршневого типа. Следует отметить, что за характеристику II типа может быть принята механическая характеристика двухфазного двигателя с полым ротором и амплитудным управлением. Так как

потребная мощность для перемещения руля зависит от текущей нагрузки и скорости движения руля, то мощность двигателя определится точкой предельной нагрузочной характеристики, соответствующей потребной максимальной мощности на всем цикле переходного процесса движения руля.

На рис. 2.6 дана полная нагрузочная характеристика руля, соответствующая режиму переходного процесса, представленного на рис. 2.1. Первый квадрант диаграммы нагрузочной характеристики представляет начальную фазу переходного процесса руля, включая разгон двигателя, т.е. двигательный режим работы рулевой машины с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением. В этом же квадранте имеют место максимальные скорости и нагрузки на руле. Следовательно, в этом промежутке времени переходного процесса, которому соответствует нагрузочная характеристика первого квадранта, имеет место максимальная потребная мощность двигателя для выполнения заданного переходного процесса руля с определенной нагрузкой. На полной нагрузочной характеристике в I квадранте графика определяется точка А, соответствующая мгновенной максимальной мощности. Для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, как было установлено ранее, механическая характеристика определяется прямой для некоторого постоянного по величине управляющего напряжения U_1 . В общем случае для каждого значения U_1 будет своя механическая характеристика с тем же углом наклона, определяемым жесткостью $\frac{k_i k_E}{R_a}$. Если провести касательную в точке А к нагрузочной характеристике руля, то в координатах $[M_{но}, \delta_p]$ мы получим так называемую предельную нагрузочную характеристику. Из рис. 2.6. видно, что для всех точек нагрузочной характеристики руля выполняется условие

$$\begin{cases} M_{но} < M_{нпрес}, \\ M_{ноА} = M_{нпрес}. \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \delta_p < \delta_{рпрес}, \\ \delta_{рА} = \delta_{рпрес}. \end{cases} \quad (2.14)$$

Таким образом, если двигатель рулевого привода обладает механической характеристикой, эквивалентной предельной нагрузочной характеристике, то он в состоянии обеспечить выполнение заданного вида переходного процесса руля с заданной нагрузкой.

Потребная выходная мощность двигателя

$$N_{gmax} = \frac{M_{HA} \cdot \dot{\delta}_{PA}}{\eta}, \quad (2.15)$$

где η — КПД редуктора и механической проводки управления к рулю.

Если пересчитать момент $\frac{M_{HA}}{\eta}$ и скорость $\dot{\delta}_{PA}$ к валу двигателя, то получим номинальные значения момента M_{gH} и скорости ω_{gH} двигателя

$$\left. \begin{aligned} M_{gH} &= \frac{M_{HA}}{\eta V_0 K_p} \\ \omega_{gH} &= V_0 K_p \dot{\delta}_{PA} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

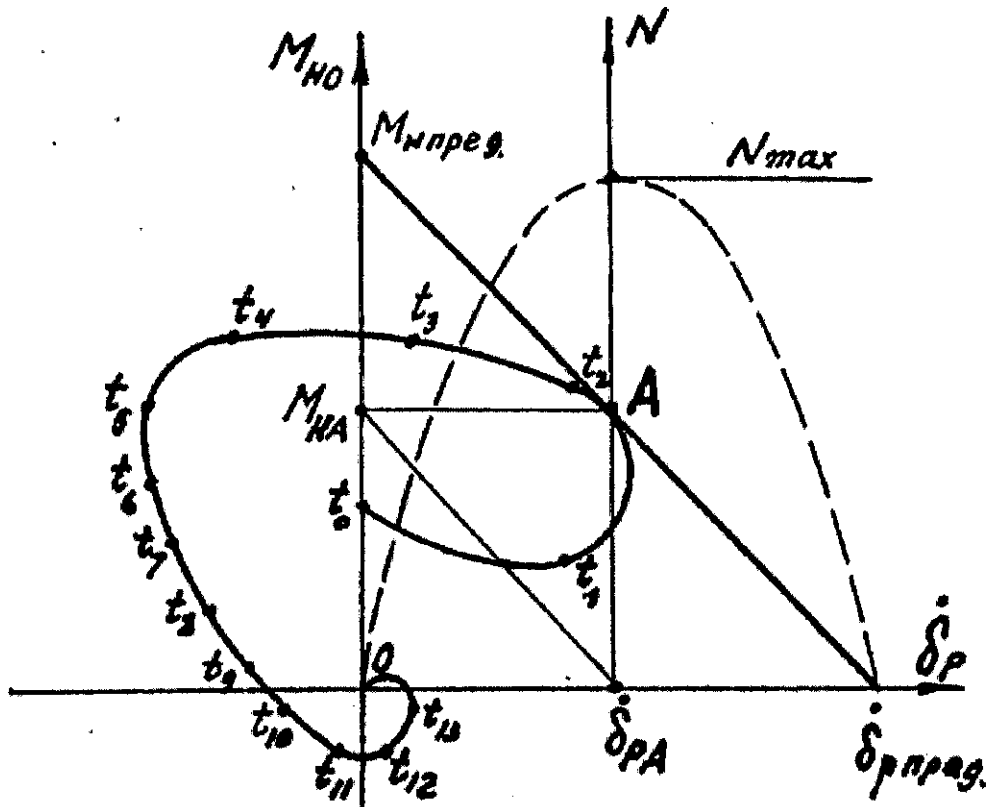


Рис. 2.6. Определение предельной нагрузочной характеристики

формулы (2.16) определяют параметры механической характеристики двигателя:

- 1) пусковой момент двигателя $M_{пуск} = 2M_{gH}$;
- 2) скорость холостого хода $\omega_{хх} = 2\omega_{gH}$;
- 3) жесткость механической характеристики $f = \frac{k_k k_e}{R_A} = \frac{t_{g0}}{t_{g0}} = \frac{M_{gH}}{\omega_{gH}} = \frac{M_{gH}}{\omega_{хх}}$.

Так как известно, что постоянная времени T_{PM} рулевой машины /см. формулу (1.31) $T_{PM} = \frac{T_0^2}{T_a}$, где $T_0 = \frac{T_{PM} K_E V_E}{K_y K_{ос}}$,

$T_a = \frac{K_E V_0}{K_y K_{ac}}$ - параметры, которые получаются в результате расчета контура стабилизации ЛА (из анализа канала автопилота), то по требуемому значению T_{PM} , которое равно

$$T_{PM} = \frac{J_g + J_n + \frac{J_p}{K_p^2 V_0^2}}{f}, \quad (2.17)$$

проверяются допустимые пределы значения момента инерции J_g двигателя, ориентировочно определенного по аналогу - двигателю с выходной мощностью, близкой к потребной.

Итак, имеем

$$J_g = f \cdot T_{PM} - J_n - \frac{J_p}{K_p^2 V_0^2}. \quad (2.18)$$

Если допустимое J_g окажется меньше значения исходного J_g , то следует несколько увеличить V_0 (до 10%) или повысить жесткость f (практически до 10-15%).

§ 3. Последовательность расчета потребной мощности двигателя и его статических и динамических характеристик

1. Вычисляются и строятся графически переходные процессы движения руля ЛА (отклонение, угловые скорости и ускорения).

2. Вычисляется и строится переходная функция внешней нагрузки на руле (шарнирный и инерционный моменты руля).

3. Проводится анализ режимов изменения нагрузки на руле и режима работы рулевой машины в переходном процессе движения руля. Выделяются двигательные режимы работы с максимальными нагрузками и скоростями (обычно в начальной фазе переходного процесса).

4. Определяется максимальная потребная мощность на преодоление нагрузки в чисто двигательном режиме работы рулевой машины. Определяются по расчетным табличным данным внешняя нагрузка и скорости движения руля и строится график мощности в переходном процессе.

5. По потребной максимальной мощности в двигательном режиме определяется по нормалам или каталогу двигатель-аналог, соответствующий по принципу действия и управления проектируемому двигателю, и его момент инерции J_g принимается за расчетный.

6. По формулам (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) определяется передаточное число V_0 редуктора рулевой машины, оптимизирующее номинальный потребный момент двигателя.