

## 8. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

### 8.1. Общие положения

Целью расчета является обеспечение технологических задач, заложенных в требования к электроприводу. Технологические скорости рабочего и обратного хода в установившемся режиме, пониженные скорости при пуске и остановке рабочего органа должны быть обеспечены с заданной степенью точности.

Заданными данными для расчета являются скорость движения механизма  $\omega_{зад} = \omega_c$ , приведенная к валу двигателя, и заданный момент сопротивления движению  $M_c$ , приведенный к валу двигателя и включающий в себя момент механических потерь холостого хода двигателя  $\Delta M_x$ .

По результатам расчетов механической части из таблицы 5.1 получены заданные точки установившихся режимов работы.

Задачей расчета является определение параметров электропривода (в зависимости от конкретной схемы управления), при которых выполняются требования к электроприводу по обеспечению заданных скоростей движения рабочего органа (рабочей машины).

Исходными данными для расчета статических характеристик являются каталожные данные электродвигателя и другого оборудования, установленного в его силовой цепи.

### 8.2. Расчет естественных характеристик электродвигателей

С помощью естественной характеристики оценивают возможности двигателя при его работе в механической системе:

- выдерживать предельные значения тока (момента), которые двигатель может развивать кратковременно;
- обеспечивать перевод двигателя в генераторный режим и др.

Расчет естественной характеристики выполняют аналитическим, графическим или графоаналитическим методами. Наиболее точным изображением естественной характеристики двигателя является ее каталожная кривая. При наличии каталожной кривой отпадает необходимость в расчете характеристики, лишь иногда для получения на базе естественной характеристики искусственных характеристик приходится линеаризовать естественную характеристику на рабочем участке. Характеристики двигателей постоянного тока довольно легко рассчитываются аналитическим методом ввиду простоты уравнений их описывающих. Для двигателей переменного тока в курсовом проекте предусмотрен не только аналитический расчет, но и расчет посредством специализированных программ.

#### 8.2.1. Естественные характеристики двигателя независимого возбуждения

Каталожными данными двигателя постоянного тока независимого возбуждения являются номинальные данные:

$U_n$  – номинальное напряжение на якоре, В;

$P_n$  – номинальная мощность на валу, кВт;

$I_n$  – номинальный ток якорной цепи, А;

$n_n$  – номинальная частота вращения, об/мин,  
 $n_{\text{макс}}$  – максимальная допустимая частота вращения, об/мин;  
 $M_{\text{макс}}$  – максимальный вращающий момент, кгм;  
 $J_{\text{об}}$  – момент инерции якоря, кгм<sup>2</sup> (или  $GD^2 = 4 J_{\text{об}}$  – маховый момент).

В каталогах некоторых серий двигателей (в частности, краново-металлургической серии Д) и справочниках [18, 21, 24] приводятся:

$2p_n$  – число полюсов;  
 $N$  – число активных проводников якоря;  
 $2a$  – число параллельных ветвей якоря;  
 $r_{\text{оя}}$  – сопротивление обмотки якоря, Ом;  
 $r_{\text{он}}$  – сопротивление обмотки добавочных полюсов, Ом;  
 $w_{\text{ен}}$  – число витков параллельной обмотки на полюс;  
 $r_{\text{ов}}$  – сопротивление параллельной обмотки, Ом;

$\Phi_n$  – номинальный магнитный поток на полюс, мВб, а также характеристики намагничивания двигателей  $\Phi=f(F)$  и рабочие характеристики – каталожные зависимости от тока якоря  $I$  частоты вращения  $n=f(I)$ , момента на валу  $M_e=f(I)$ , мощности на валу  $P_e=f(I)$  и коэффициента полезного действия  $\eta=f(I)$ .

Необходимо отметить, что для дальнейших расчетов каталожные данные частоты вращения  $n$  и момента  $M$  нужно пересчитать в единицах измерения системы СИ:

$$\omega \text{ (рад/с)} = n \text{ (об/мин)} / 9,55;$$

$$M \text{ (Нм)} = 9,81M \text{ (кгм)}.$$

Механические характеристики двигателя независимого возбуждения прямолинейны и математически выражаются формулой:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - M \frac{R}{(k\Phi)^2}. \quad (8.1)$$

Для естественной механической характеристики напряжение равно номинальному  $U = U_n$ , поток равен номинальному  $\Phi = \Phi_n$ , сопротивление якорной цепи равно внутреннему (невключаемому):

$$R = r_{\text{оя}} + r_{\text{он}} + r_{\text{ко}} = r_{\text{я}};$$

при этом следует обратить внимание, что в некоторых конструкциях двигателей могут отсутствовать компенсационная обмотка и обмотка добавочных полюсов. Учитывая вышеизложенное, уравнение для естественной механической характеристики принимает вид

$$\omega = \frac{U_n}{k\Phi_n} - M \frac{R_{\text{я}}}{(k\Phi_n)^2}. \quad (8.2)$$

При отсутствии данных по сопротивлению якорной цепи величина  $r_{\text{я}}$  может быть приближенно определена из условия равенства постоянных и переменных потерь в номинальном режиме по формуле

$$R_{\text{я}} = \frac{U_n \cdot I_n - P_n}{2I_n^2}. \quad (8.3)$$

Произведение  $k\Phi_n$  также можно определить через каталожные данные

$$k\Phi_H = \frac{U_H - I_H \cdot r_{Я}}{\omega_H} \quad (8.4)$$

Естественная механическая характеристика строится по двум точкам:  
( $\omega_n, M_n$ ) и ( $\omega_{0n}, M=0$ ).

Скорость идеального холостого хода  $\omega_{0H}$  определяется по формуле

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} \quad (8.5)$$

Электромагнитный момент

$$M_H = k\Phi_H \cdot I_H, \quad (8.6)$$

который двигатель развивает при нормальной частоте вращения  $\omega_n$ .

Необходимо отметить, что механические характеристики двигателей  $\omega=f(M)$  строятся в зависимости от электромагнитного момента

$$M = M_B + M_X \quad (8.7)$$

Момент потерь холостого хода часто принимают постоянным и равным номинальному моменту потерь холостого хода. Определяют эту величину по каталожным данным номинального режима

$$M_{XH} = M_H - M_{BH} \quad (8.8)$$

$$M_{BH} = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (8.9)$$

где  $M_{BH}$  – номинальный момент на валу двигателя.

Естественная электромеханическая характеристика  $\omega=f(I)$  определяется соотношением

$$\omega_H = \frac{U_H - I_H \cdot r_{Я}}{k\Phi_H} \quad (8.10)$$

и строится также по двум точкам: ( $\omega_n, I_n$ ) и ( $\omega_{0n}, I=0$ ).

Часто в рамках автоматизированного электропривода используются характеристики, построенные в относительных единицах (о.е.). Для перехода к о.е. назначаются базовые величины, за которые обычно принимаются номинальные значения:  $U_{\bar{o}} = U_n, I_{\bar{o}} = I_n, \Phi_{\bar{o}} = \Phi_n$  и лишь за базовую частоту вращения  $\omega_{\bar{o}} = \omega_{0n}$ .

Базовые значения других переменных определяются через базовые значения основных переменных:

$$M_{\bar{o}} = M_n = \kappa \cdot \Phi_n \cdot I_n;$$

$$E_{\bar{o}} = E_n = \kappa \cdot \Phi_n \cdot \omega_{0n};$$

$$R_{\bar{o}} = R_n = U_n / I_n.$$

Естественные механическая и электромеханическая характеристики в о.е. совпадают

$$\begin{aligned} \bar{\omega} &= 1 - \bar{M} \cdot \bar{r}_{Я}; \\ \bar{\omega} &= 1 - \bar{I} \cdot \bar{r}_{Я}; \\ \bar{I} &= \bar{M}; \end{aligned} \quad (8.11)$$

и строятся по точкам:

$$(\bar{\omega} = 1, \bar{M} = 0) \text{ и } (\bar{\omega} = 1 - \bar{r}_{Я}, \bar{M} = 1).$$

Использование изображения характеристик в о.е. позволит в дальнейшем легко строить искусственные характеристики и определять параметры схем включения.

### 8.2.2. Естественные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Двигатели последовательного возбуждения постепенно вытесняются из электроприводов промышленных механизмов асинхронными двигателями. Эти двигатели сохраняют свое место в электроприводе транспортных устройств (электровозы, троллейбусы, трамваи) благодаря их достоинствам для этого типа приводов:

- однопроводное питание;
- поток не зависит от напряжения сети;
- постоянство статической мощности;
- возможность форсирования переходных режимов и т.д.

Обмотка возбуждения двигателя последовательного возбуждения включается в цепь якоря, и поток машины определяется током якоря, который в данном случае одновременно является и током возбуждения. Механическая и электромеханическая характеристики двигателя определяются кривой намагничивания машины, поэтому, естественные характеристики не поддаются аналитическому расчету. Расчет характеристик двигателя – графоаналитический, и исходными данными для расчета являются каталожные кривые – зависимости от тока якоря  $I$  момента на валу  $M_\delta$  и частоты вращения  $n$ , а также мощности на валу  $P_\delta$  и коэффициента полезного действия  $\eta$ .

В каталогах [Д] приводятся также номинальные данные двигателя ( $P_n, I_n, U_n, n_n$ ), а также предельные значения момента  $M_{\text{макс. доп}}$  и частоты вращения  $\omega_{\text{макс}}$ , момент инерции якоря  $J_{\text{я}}$  или маховый момент  $GD^2 = 4 J_{\text{я}}$ . Для двигателей краново-металлургической серии (двигатели типа Д) приводятся значения допускаемых нагрузок  $P, I, n$  при каталожных значениях ПВ, что позволяет построить участок электромеханической характеристики.

Для дальнейших расчетов искусственных характеристик целесообразно построить зависимости электромагнитного момента  $M_{\text{эм}}(I)$  и тормозного момента  $M_T(I)$ . Для этого задаются током якоря  $I_{\text{зад}}$ , по каталожным кривым определяют частоту вращения  $\omega_e$  на естественной электромеханической характеристике и значение момента на валу  $M_\delta$  по каталожной зависимости  $M_\delta(I)$ .

Электромагнитный момент рассчитывается по соотношению

$$M_{\text{эм}} = k\Phi \cdot I_{\text{Зад}} = \frac{U_n - I_{\text{Зад}} \cdot (r_{\text{я}} + r_{\text{об}})}{\omega_{\text{в}}} \cdot I_{\text{Зад}} \quad (8.12)$$

а тормозной момент

$$M_T = 2 \cdot M_{\text{эм}} - M_\delta \quad (8.13)$$

По результатам расчетов строятся зависимости  $M_{\text{эм}}(I)$  и  $M_T(I)$ , а также естественная механическая характеристика  $\omega = f(M_{\text{эм}})$ .

### 8.2.3. Естественные характеристики асинхронного двигателя

В каталогах электротехнической промышленности [15, 16] приводятся номинальные данные двигателя:

$U_{1н}$  – номинальное напряжение статора, В;

$I_{1н}$  – ток статора, А;

$P_n$  – мощность на валу, кВт;

$n_n$  – частота вращения, об/мин,

$\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности;

$\eta_n$  – коэффициент полезного действия,

а также

$M_k$  – максимальный момент, Нм;

$n_{\max}$  – максимальная частота вращения, об/мин;

$J_{\text{об}}$  – момент инерции ротора, кгм<sup>2</sup>.

Для двигателя с фазным ротором:

$E_{20}$  – напряжение на кольцах заторможенного разомкнутого ротора, В;

$I_{2н}$  – номинальный ток ротора, А.

Для двигателя с короткозамкнутым ротором:

$M_n$  – пусковой момент, Нм;

$I_n$  – пусковой ток статора, А.

Кроме номинальных данных, в каталогах двигателей краново-металлургической серии  $MTF(H)$  приводятся каталожные кривые – зависимости от скольжения  $S$  момента двигателя  $M(S)$ , тока статора  $I_1(S)$  и  $\cos \varphi(S)$ , а также допускаемые нагрузки  $P$ ,  $n$ ,  $I$  при каталожных значениях продолжительности включения  $PB_{\text{кат}}$ .

Наиболее точной механической характеристикой асинхронного двигателя является каталожная зависимость  $M(S)$ , и лишь при отсутствии каталожной зависимости приходится обращаться к приближенным расчетам.

При известных сопротивлениях статора  $r_1$ ,  $x_1$  и ротора  $r_2$ ,  $x_2$  для расчета естественной механической характеристики используют уточненную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_k \cdot (1 + \alpha S_k)}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k} + 2\alpha S_k}; \quad (8.14)$$

$$S_k = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}; \quad (8.15)$$

$$\alpha = \frac{r_1}{r'_2}; \quad (8.16)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{1\Phi H}^2}{2\omega_{0H} \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right)}; \quad (8.17)$$

$$r'_2 = k_B^2 \cdot r_2;$$

$$x'_2 = k_B^2 \cdot x_2;$$

$$k_B \cong \frac{0,95 \cdot U_{1H}}{E_{20}};$$

$$\omega_{0H} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}{p_n}; \quad (8.18)$$

где  $S_k$  – критическое скольжение;

$M_k$  – максимальный момент двигателя, Нм; обычно в каталогах приводится  $M_{\text{макс}} = M_k$ ;

$r_2'$  – приведенное активное сопротивление ротора, Ом;

$x_2'$  – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора, Ом;

$k_e$  – коэффициент трансформации;

$\omega_{0H}$  – синхронная скорость вращения поля статора, рад/с;

$f_{1H}$  – номинальная частота напряжения статора, Гц;

$p_n$  – число пар полюсов.

Если сопротивления цепей неизвестны, то используют формулу (8.14), в которой принимают  $a = 1$ , а критическое скольжение рассчитывают по формуле:

$$S_k = S_H \cdot \frac{\mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1 + 2\alpha \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)}}{1 - 2\alpha \cdot S_H \cdot (\mu_k - 1)}, \quad (8.19)$$

$$S_H = \frac{\omega_{0H} - \omega_H}{\omega_{0H}};$$

где  $\mu_k$  – перегрузочная способность асинхронного двигателя;

$S_H$  – номинальное относительное скольжение.

При увеличении номинальной мощности  $P_H$  двигателя величина активного сопротивления статора снижается, а при  $P_H > 10$  кВт [1] можно пренебречь его величиной  $r_1 \approx 0$ . Тогда  $a = 0$ , выражение механической характеристики (8.14) преобразуется к виду

$$M = \frac{2M_k}{\frac{S_k}{S} + \frac{S}{S_k}}; \quad (8.20)$$

а выражение критического скольжения (8.18) – к виду

$$S_k = S_H \cdot \left( \mu_k \pm \sqrt{\mu_k^2 - 1} \right). \quad (8.21)$$

Момент потерь холостого хода асинхронного двигателя  $M_x$  рассчитать довольно сложно из-за отсутствия каталожных данных по сопротивлениям статора и ротора. Поэтому в расчетах асинхронного электропривода можно не учитывать момент потерь холостого хода ( $M_x \approx 0$ ), а электромагнитный момент в установившемся режиме принимать равным статическому моменту.

Электромеханические характеристики асинхронного двигателя – зависимости частоты вращения ротора  $\omega$  от тока статора  $\omega(I_1)$ , от тока ротора  $\omega(I_2)$ , от тока намагничивания  $\omega(I_\mu)$ . Расчет этих зависимостей достаточно сложен, так как не-

обходим учет сопротивлений статора и ротора и их изменений в зависимости от частоты токов ротора и статора. Также при расчете необходимо учитывать изменение сопротивления контура намагничивания с помощью кривой намагничивания. Чаще всего на стадии проектирования электропривода сопротивления обмоток и кривая намагничивания не известны.

С достаточной точностью для расчета электромеханических характеристик двигателя при питании от цеховой сети (напряжение постоянной амплитуды и частоты) можно использовать формулы профессора В.А.Шубенко. Эти формулы получены при не учете активного сопротивления статора ( $r_1 = 0$ ) и используют только каталожные данные двигателя.

Ток холостого хода (ток намагничивания)

$$I_{\mu H} = I_{1H} \cdot \left( \sin \varphi_H - \frac{S_H}{S_k} \cdot \cos \varphi_H \right). \quad (8.22)$$

Ток ротора

$$I_2 = I_{2H} \cdot \sqrt{\frac{M \cdot S}{M_H \cdot S_H}}. \quad (8.23)$$

Ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{\mu H}^2 + (I_{1H}^2 - I_{\mu H}^2) \cdot \frac{M \cdot S}{M_H \cdot S_H}}. \quad (8.24)$$

При известных величинах сопротивлений статора и ротора расчет токов в этих цепях выполняется известными из ТОО методами расчета цепей переменного тока для Т – образной или Г – образной схем замещения асинхронного двигателя [7] или с помощью его круговой диаграммы [16]. Если сопротивления цепей статора и ротора неизвестны, их можно рассчитать (с довольно большой погрешностью) через каталожные данные двигателя.

Для двигателя с фазным ротором:

$$r_2 \cong \frac{E_{20}}{\sqrt{3} \cdot I_{2H}} \cdot S_H;$$

$$r'_2 \approx r_1;$$

$$x_K \approx \sqrt{\frac{r'^2_2}{S_k^2 - r_1^2}};$$

$$x_1 = x'_2 \cong \frac{x_K}{2};$$

$$x_\mu \cong \frac{U_{1H}}{I_{\mu H}} - x_1;$$

Для двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$r'_2 \cong \frac{M_n \cdot \omega_{0H}}{3I_n^2}.$$

### 8.3. Расчет параметров схем включения, обеспечивающих работу двигателя в заданных точках

#### 8.3.1. Расчет параметров схем включения посредством специализированных программ:

Для расчета статических и динамических характеристик электропривода сотрудниками кафедры под руководством Г.И. Драчева были разработаны специализированные программы для среды *Matlab 7.0*.

Методические указания к программам и правила работы с программами описаны в Приложениях П.

#### 8.3.2. Расчет параметров схем включения графическим методом:

– на одном графике (рисунок 8.1) строится естественная механическая характеристика и указываются координаты заданных точек  $M_c$  и  $\omega_c$ ;

– строятся желаемые механические характеристики, проходящие через заданные точки;

– параллельным переносом естественной характеристики (*// ест*), проходящей через заданную точку, определяется  $\omega_{0зад}$  – заданная скорость идеального холостого хода (синхронная скорость);

– характеристика, проходящая через заданную точку  $M_c$  и  $\omega_c$  и точку  $\omega_{0н}$ , отсекает при  $M_n$  отрезок  $(r+R_{зад})$ , позволяющий при известном невыключаемом сопротивлении двигателя графически определить добавочное сопротивление  $R_{зад}$  в силовой цепи двигателя.

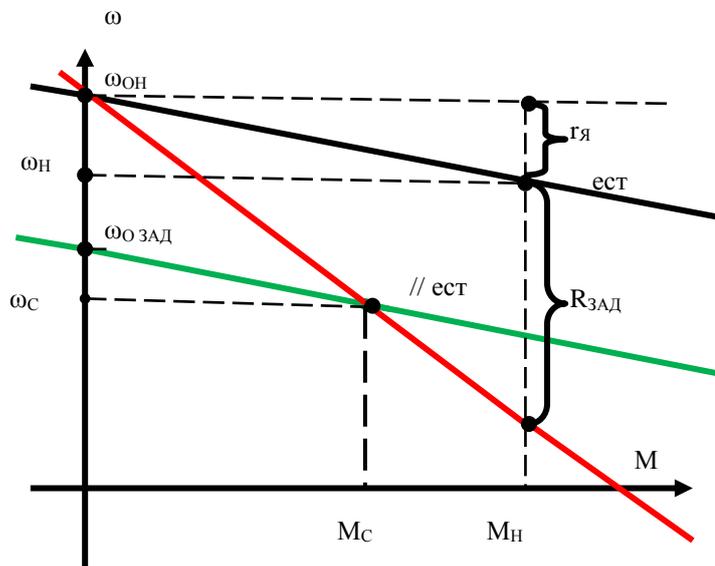


Рисунок 8.1 – Определение  $\omega_{0зад}$  и  $R_{зад}$  графическим методом

#### 8.3.3. Расчет параметров схем включения аналитическим методом

##### 8.3.3.1. Расчет добавочных сопротивлений ДНВ при питании от сети

При питании двигателя постоянного тока независимого возбуждения от сети заданный режим работы в точках, не лежащих на естественной характеристике

двигателя, обеспечивается введением добавочных сопротивлений в цепи двигателя.

Для двигателя независимого возбуждения при расчете сопротивлений используется выражение искусственной механической характеристики путем подстановки координат заданной точки  $\omega = \omega_{зад}$  и  $M = M_{зад}$ :

$$\omega = \frac{U_H}{k\Phi_H} - M \frac{R_{доб} + r_{я}}{(k\Phi_H)^2}. \quad (8.25)$$

Если заданная точка находится ниже естественной характеристики, принимают  $k\Phi = k\Phi_H$  и решают уравнение (8.25) относительно  $R_{доб}$  в цепи якоря.

Эту задачу можно решить и в относительных единицах, и графическим методом.

Для расчета режима ослабления поля, когда заданная точка лежит выше естественной характеристики, в уравнении (8.25) принимают  $R_{доб} = 0$  и решают уравнение относительно  $k\Phi$ . Приняв приемлемое значение  $k\Phi$ , при котором искомая характеристика проходит через заданную точку, с помощью кривой намагничивания двигателя определяют значение тока возбуждения  $I_{восл}$  при ослабленном поле. Кривая намагничивания иногда приводится в каталогах (для двигателей типа Д). При отсутствии «родной» кривой намагничивания используют универсальную кривую из справочников [3].

По полученному значению  $I_{восл}$  рассчитывают добавочное сопротивление  $R_{доб}$  в цепи обмотки возбуждения или напряжение на обмотке возбуждения при ослабленном поле, если обмотка получает питание от возбудителя.

### 8.3.3.2. Расчет добавочных сопротивлений ДПВ при питании от сети.

Для двигателя последовательного возбуждения расчет сопротивлений в цепи якоря для обеспечения работы в заданной точке выполняют по формуле искусственной характеристики:

$$\omega_{и} = \omega_{в} \frac{U_H - I(r_{я} + r_{ов} + R_{доб})}{U_H - I(r_{я} + r_{ов})}, \quad (8.26)$$

которую решают относительно  $R_{доб}$  при  $\omega_{и} = \omega_{зад}$ ,  $I = I_{зад}$ . При этом значения  $I_{зад} = f(M_{зад})$  и  $\omega_e = f(I_{зад})$  определяют графическим путем по каталожным кривым.

### 8.3.3.3. Расчет добавочных сопротивлений ротора асинхронного двигателя при питании от сети.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором расчет добавочных сопротивлений в цепи ротора для обеспечения работы в заданной точке наиболее прост при использовании формулы соотношения скольжений и сопротивлений при постоянстве момента  $M = \text{const}$ :

$$\frac{S_E}{S_{и}} = \frac{r_2}{R_2}. \quad (8.27)$$

В этой формуле

$$S_u = \frac{\omega_0 - \omega_u}{\omega_0}$$

– скольжение на искусственной реостатной характеристике,

$$R_2 = r_2 + R_{2\text{доб}}$$

– полное сопротивление фазы ротора.

Для расчета  $R_{2\text{доб}}$  определяют скольжение  $S_e$  на естественной механической характеристике при  $M=M_c$ , принимают  $\omega_u = \omega_{3a\partial}$  и  $R_2$  рассчитывают по (8.27).

Расчет искусственной характеристики выполняют по той же формуле (8.27), только при известном  $R_2$  определяют  $S_u$  и  $\omega_u$  при различных моментах двигателя.

#### 8.3.3.4. Расчет ЭДС преобразователя в системе ТП–Д при работе в заданной точке

При питании двигателя от преобразователя параметры электропривода регулируются плавно. Определение параметров, необходимых для работы двигателя в заданной точке, сводится к уточнению возможности обеспечения преобразователем уровня искомых параметров при различных нагрузках и колебаниях напряжения питающей сети.

При работе в системе ТП–Д в якорной цепи появляется дополнительное падение напряжения в силовой цепи за счет:

– дополнительных сопротивлений обмоток трансформатора (токоограничивающего реактора);

– возникновения провалов мгновенного значения ЭДС в периоды коммутации тиристоров;

– падения напряжения на тиристорах в открытом состоянии.

Эквивалентное активное сопротивление обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной цепи, рассчитывают по формуле:

$$r_{\text{TP}} = \frac{P_{\text{K3}}}{3I_{2\text{H}}^2},$$

для трехфазной мостовой схемы выпрямления дополнительное сопротивление от обмоток трансформатора составляет

$$R_{\text{T}} = 2R_{\text{TP}}. \quad (8.28)$$

Снижение выпрямленной ЭДС за счет коммутационных провалов учитывается сопротивлением

$$R_{\text{Э}} = \frac{m \cdot x_{\text{T}}}{2\pi}. \quad (8.29)$$

в котором эквивалентное индуктивное сопротивление фазы трансформатора рассчитывают исходя из:

$$z_{\text{TP}} = \frac{U_{2\text{H}} \cdot U_{\text{K}}^{\%}}{I_{2\text{H}} \cdot 100},$$

$$x_{\text{TP}} = \sqrt{z_{\text{K3}}^2 - r_{\text{K3}}^2}.$$

Падение напряжения на открытых тиристорах для трехфазной мостовой схемы составляет

$$\Delta U_{\epsilon} = (1 \dots 2), \text{ В.}$$

Выражение электромеханической характеристики двигателя в системе ТП–Д имеет вид:

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{\text{В}} - I(r_{\text{Я}} + R_{\text{T}} + R_{\text{P}})}{k\Phi_{\text{H}}}, \quad (8.30)$$

где значение максимальной выпрямленной ЭДС на выходе тиристорного преобразователя определяется выражением:

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{\sin(\pi/6)}{(\pi/6)} = 1.35 \cdot E_{\text{Л}} = 2.34 \cdot E_{\Phi}. \quad (8.31)$$

После подстановки

$$\omega = \omega_{\text{ЗАД}}, I = I_{\text{ЗАД}} = \frac{M_{\text{С}}}{k\Phi_{\text{H}}}, \quad (8.32)$$

получают среднее значение выпрямленной ЭДС

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (8.33)$$

и при необходимости –  $\cos \alpha$  (см. рисунок 8.2).

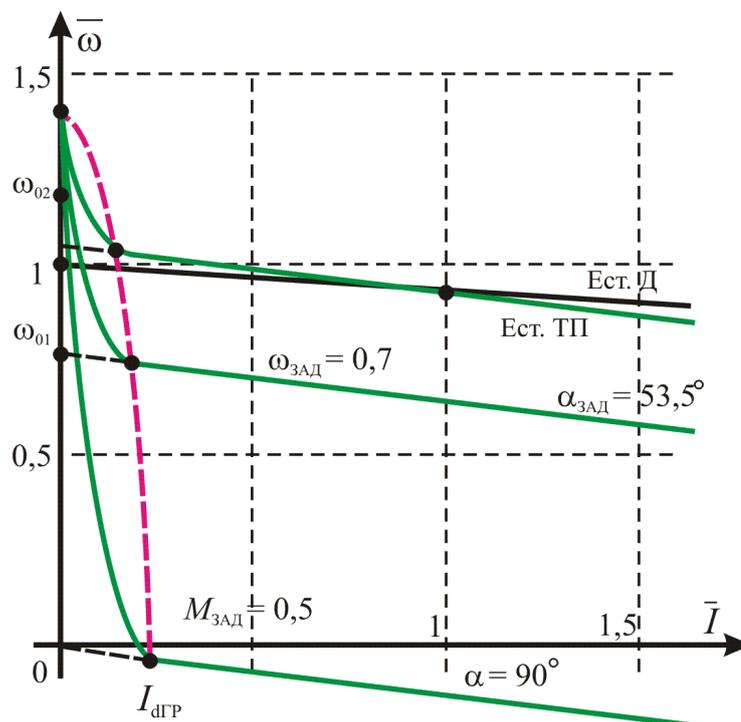


Рисунок 8.2 – Расчет искусственных характеристик в системе ТП–Д

Естественная электромеханическая характеристика системы ТП–Д проходит через точку  $(\omega_{\text{н}}, I_{\text{н}})$  при напряжении

$$U_{\text{н}} = E_{d0} \cos \alpha_{\text{н}}.$$

При этом углу  $\alpha_{\text{н}}$  соответствует напряжение управления  $U_{\text{ун}}$  преобразователем. В документации на тиристорные преобразователи зачастую не приводится

его регулировочная характеристика, однако можно установить базовое напряжение  $U_B$  на аналоговом входе, при котором на выходе преобразователя устанавливается номинальное напряжение. Коэффициент усиления ТП определяют

$$k_{ТП} = \frac{U_H}{U_B}. \quad (8.34)$$

Различные скорости вращения двигателя могут быть получены параллельным переносом характеристики системы ТП–Д вниз от естественной.

Полученные зависимости не учитывают режим прерывистых токов, поэтому в зоне малых нагрузок рассчитывать скорости по (8.30) не рекомендуется. «Граничные» значения зоны прерывистых токов зависят от угла регулирования  $\alpha$  и параметров схемы выпрямления. Величина граничного тока для трехфазной мостовой схемы ( $m=6$ ) определяется по приближенной формуле

$$I_{ГР} = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{2\pi \cdot f_{1H} \cdot (2L_T + L_{Я} + L_P)} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot ctg \frac{\pi}{m}\right). \quad (8.35)$$

Для заданной скорости  $\omega_{зад}$  определяют значение напряжения и угол  $\alpha$ , и проверяют режим работы преобразователя.

Если  $I_{зад} < I_{ГР}$ , то преобразователь работает в режиме прерывистого тока и необходимо уточнение вида характеристик. Методика расчета характеристик приведена в [5].

### 8.3.3.5. Расчет частоты и напряжения двигателя в системе ПЧ–АД при работе в заданной точке

При питании асинхронного двигателя от преобразователя частоты в процессе преобразования напряжения промышленной частоты в напряжение регулируемой амплитуды и регулируемой частоты возникают потери напряжения и мощности в преобразователе. Обычно такие преобразователи имеют внутренние обратные связи, и при изменении нагрузки двигателя выходное напряжение и частота практически не изменяются. Поэтому в дальнейшем напряжение и частоту на статоре двигателя будем считать независимыми от нагрузки.

Синхронная скорость двигателя  $\omega_0$  зависит от частоты питающей сети  $f_1$  и числа пар полюсов  $p_n$  и рассчитывается по формуле 8.18.

Для устойчивой работы двигателя необходимо при изменении частоты поддерживать перегрузочную способность двигателя, что обеспечивается регулированием напряжения на статоре по различным законам в зависимости от частоты и от характера изменения статического момента. Эти особенности необходимо учитывать при расчете частоты и амплитуды напряжения.

Наиболее распространен закон изменения амплитуды напряжения пропорционально частоте  $U/f = \text{const}$ . При таком законе (если принять  $r_1=0$ ) максимальный момент постоянен  $M_k \cong \text{const}$  и не зависит от частоты. Также не зависит от частоты

$$\Delta\omega_k = \omega_0 - \omega_k \approx \text{const}.$$

Это позволяет для приближенных расчетов (если принять  $r_1=0$ ) использовать прием параллельного переноса естественной механической характеристики, при

этом, естественная характеристика перемещается вдоль оси  $\omega$  и устанавливается в точке  $\omega_{зад}$ ,  $M_{зад}$ . В этом случае синхронная скорость, соответствующая заданной точке,

$$\omega_{0зад} = \omega_{зад} + \Delta\omega_e, \quad (8.36)$$

где  $\Delta\omega_e$  – отклонение скорости от синхронной на естественной характеристике при заданном моменте  $M_{зад}$ .

Частота напряжения в заданной точке

$$f_{1зад} = \frac{\omega_{0зад}}{\omega_{0н}} \cdot f_{1н} = \alpha \cdot f_{1н}, \quad (8.37)$$

где  $f_{1н} = 50$  Гц – номинальная частота напряжения на статоре;

$\omega_{0н}$  – синхронная частота вращения двигателя при номинальной частоте  $f_{1н}$ .

Напряжение на статоре можно определить из формулы (8.17)

$$U_{13АД} = \sqrt{\frac{2M_k \cdot \alpha \cdot \omega_{0н} \cdot (r_1 + \sqrt{r_1^2 + (\alpha x_k)^2})}{3}}, \quad (8.38)$$

принимая для обеспечения перегрузочной способности двигателя

$$M_k = (2 \div 3) M_{зад}. \quad (8.39)$$

Относительное напряжение

$$\gamma = \frac{U_{13АД}}{U_{ФН}}. \quad (8.40)$$

При законе регулирования амплитуды напряжения пропорционально частоте  $U/f = \text{const}$ , относительное значение напряжения на статоре  $\gamma$  равно отношению значения частоты напряжения на статоре  $\alpha = \gamma$ .

Используя Т – образную схему замещения асинхронного двигателя, рассчитывают механическую и электромеханические характеристики, обеспечивающие работу двигателя в заданной точке.

Для расчета характеристик можно использовать основные соотношения для асинхронного двигателя при частотном управлении  $M, I_1, I_2' = f(\alpha, \gamma)$ , полученные для Т – образной схемы замещения. В связи с тем, что  $f_{1зад}$  и  $U_{1зад}$  были определены приближенно ( $r_1 \approx 0$ ), в процессе расчета приходится уточнять значения частоты и напряжения, чтобы механическая характеристика проходила через заданную точку.

Существенно облегчает расчет применение программы *harad* из каталогов вычислительного центра кафедры электропривода ЮУрГУ. Программа позволяет уточнить значения частоты и напряжения, так как учитывает активные сопротивления обмоток фаз статора  $r_1$ . В результате расчета добиваются прохождения механической характеристики через заданную точку. Характеристики двигателя для скорректированных значений частоты и напряжения выводятся на дисплей и на печать в виде таблицы или графиков.

Для расчета используется Т – образная схема замещения асинхронного двигателя. Приведенные выражения получены путем решения комплексных уравне-

ний, записанных для Г – образной схемы. (В программе «harad» эти уравнения решаются программой).

Относительная частота статора:

$$\alpha = f_1 / f_{1н.}$$

Относительное напряжение:

$$\gamma = U_\phi / U_{\phi н.}$$

Абсолютное скольжение или относительная частота тока ротора

$$\alpha s = f_2 / f_{1н.} = (\omega_0 - \omega) / \omega_{0н.}$$

$$b = r_1 \cdot (1 + \tau_2); c = x_\mu \cdot \tau; d = r_1 / x_\mu; e = 1 + \tau_1$$

Коэффициенты рассеяния

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \cdot \tau_2; \tau_1 = x_1 / x_\mu; \tau_2 = x'_2 / x_\mu$$

$$M = \frac{m_1 \cdot U^2}{\omega_{0н}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{1}{2r_{1\alpha} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{\alpha s}{r_2} + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r'_2}{\alpha s}};$$

$$I_1 = U_{\phi н.} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{\frac{r_2'^2}{(\alpha s)^2 \cdot x^2 \mu} + (1 + \tau_2)^2}{2r_1 \cdot \frac{r'_2 \cdot \alpha}{\alpha s} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'^2}{(\alpha s)^2}}};$$

$$I_2' = U_{\phi н.} \cdot \gamma \cdot \frac{1}{\sqrt{2r_1 \cdot \frac{r'_2 \cdot \alpha}{\alpha s} + (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_2'^2}{(\alpha s)^2}}}.$$

$m_1$  – число фаз статора.

### **Пример 8.1 Расчет параметров схем включения, обеспечивающих работу двигателя в заданных точках**

В примере 5.1 рассчитаны точки установившихся режимов работы  $M_c$  и  $\omega_c$  при движении цепного транспортера с заготовкой и без заготовки на рабочей скорости.

В выбранной системе электропривода ПЧ-АД требуется определить частоту  $f_1$  и напряжение на статоре  $U_1$ , при которых механические характеристики будут проходить через точки установившихся режимов. Напряжение на статоре определяется законом  $U_1/f_1 = \text{const}$ .

Кроме рабочих скоростей электропривод должен обеспечивать работу на пониженных скоростях. При разгоне электропривода нужно натянуть цепь и подойти к заготовке на пониженной скорости для исключения удара в кинематической цепи, и лишь после подхвата заготовки упорами разгоняться до рабочей скорости. Перед остановкой электропривода переход на пониженную скорость необходим для обеспечения точной остановки.

Механическая характеристика пониженной скорости проходят через заданную точку ( $\omega_c \cong 0,2 \cdot \omega_{0н}$ ,  $M_c$ ) и обеспечивается при пониженной частоте на выходе ПЧ. Значения пониженных скоростей могут быть скорректированы по условиям переходных процессов

Для использования в расчетах относительных единиц в таблицу 8.1 внесены базовые величины параметров двигателя (см. пример 5.1).

Таблица 8.1 – Базовые величины параметров двигателя

Базовая величина	Единица измерения	Значение
Синхронная скорость вращения $\omega_{0н}$	рад/с	104,7
Номинальное фазное напряжение $U_{1н}$	В	220
Номинальная частота $f_{1н}$	Гц	50
Номинальный момент на валу $M_n$ (или электромагнитный момент $M_{эмн}$ )	Нм	115,4 (130,5)
Номинальный ток статора $I_{1н}$	А	29

При расчетах за базовый момент следует принимать электромагнитный номинальный момент

$$M_{эмн} = (3 \cdot U_{1н} \cdot I_{1н} \cdot \cos \varphi_{1н} - 3 \cdot I_{1н}^2 \cdot r_1) / \omega_{0н} =$$

$$= (3 \cdot 220 \cdot 29 \cdot 0,76 - 3 \cdot 29^2 \cdot 0,35) / 104,7 = 130,5 \text{ Нм},$$

но часто  $r_1$  определяют приближенно, что влияет на точность расчетов:

Таблица 8.2 – Расчетные параметры для работы цепного транспортера в заданных точках

Расчетные параметры		Скорость при движении			
		с заготовкой		без заготовки	
		Пониженная 1	Рабочая 2	Рабочая 3	Пониженная 4
<b>Заданные точки</b>					
$\omega_{зад}$	рад/с	21	83	-124,5	-21
	о.е.	0,2	0,79	-1,19	-0,2
$M_{зад}$ на валу	Нм	96,1		-1,61	
	о.е.	0,83		-0,014	
$M_c$	Нм	108,5		-14	
	о.е.	0,94		-0,12	
<b>Расчетные данные</b>					
$\omega_{0зад}$	о.е.	0,285	0,875	-1,2	-0,21
	рад/с	28,8	91,57	-125,7	22
$f_1$	о.е.	0,285	0,875	-1,2	-0,21
	Гц	14,25	43,75	-60	-10,5
$U_1$	о.е.	0,285	0,875	1	-0,21
	В	62,7	192,5	220	46,2
$R_{1доб}$	Ом	0	0	0	0

Номинальный момент на валу определяют по каталожным данным и его используют при построении графиков

$$M_n = P_n / \omega_n = 11000 \cdot 9,55 / 910 = 115,44 \text{ Нм.}$$

Заданные точки приведены в таблице 8.2 в абсолютных и относительных единицах.

Для предварительного расчета частоты выполним параллельный перенос естественной механической характеристики в заданную точку 2 и получим расчетные параметры в точке 2

– синхронная скорость

$$\omega_{0зад} = \omega_{зад} + \Delta\omega_{ест} = \omega_{зад} + M_{зад} \cdot s_n = 0,79 + 0,94 \cdot 0,09 = 0,875;$$

$$\omega_{0зад} = \omega_{0зад} \cdot \omega_{0н} = 0,875 \cdot 104,7 = 91,57 \text{ рад/с};$$

– частота и напряжение на статоре при  $U_1/f_1 = \text{const}$

$$\alpha = f_1/f_{1н} = \omega_{0зад} = 0,875; f_1 = \alpha \cdot f_{1н} = 0,875 \cdot 50 = 43,75 \text{ Гц};$$

$$U_1 = \alpha \cdot U_{1н} = 0,875 \cdot 220 = 192,5 \text{ В.}$$

Аналогично определены расчетные параметры для других точек и приведены в таблице 8.2.

Полученные значения параметров схем включения позволяют рассчитать искусственные характеристики двигателя и проверить их прохождение через заданные точки.

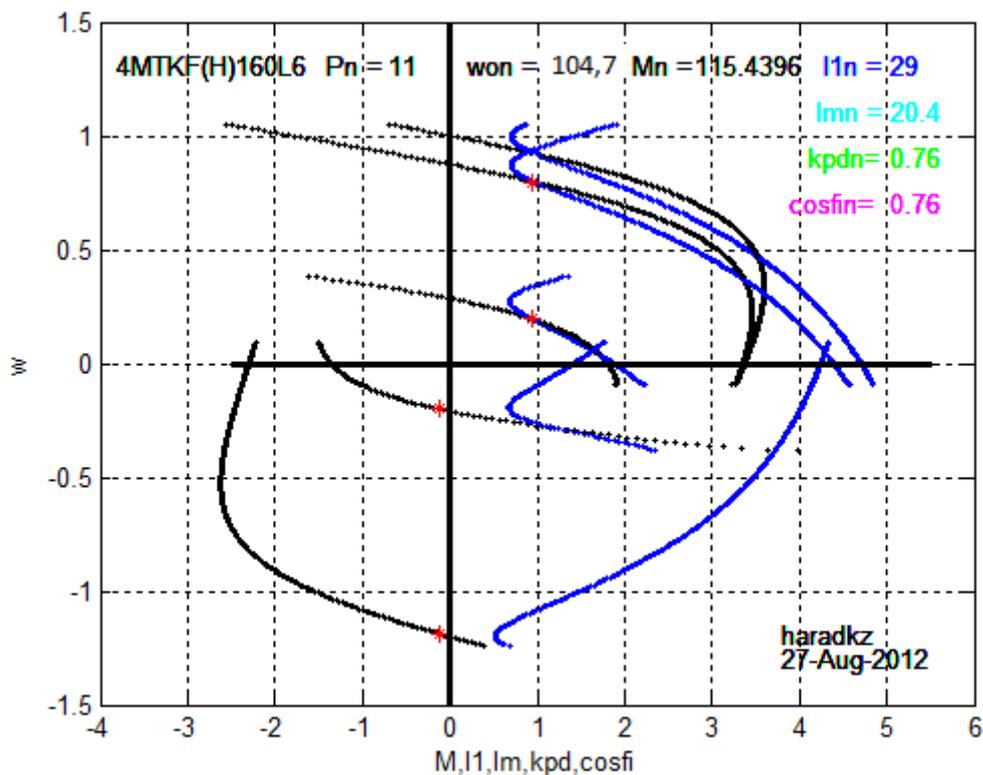


Рисунок 8.3 – Характеристики, проходящие через заданные точки

*Воспользуемся программой «haradkz.m». Вводя величины  $f_{1зад}$  и  $U_{1зад}$  для каждой из характеристик, последовательно рассчитываем естественные и искусственные механические  $\omega(M)$  и электромеханические  $\omega(I_{1н})$  характеристики. Характеристики представлены на рисунке 8.3.*

*Как видно из построения, каждая из механических характеристик прошла через свою заданную точку.*