

## Е. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАБОТУ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЗАДАННЫХ ТОЧКАХ

### Е.1. Расчет добавочных сопротивлений при питании от сети

При питании двигателя от сети заданный режим работы в точках, не лежащих на естественной характеристике двигателя, обеспечивается введением добавочных сопротивлений в цепи двигателя.

**Е.1.1** Для двигателя независимого возбуждения при расчете сопротивлений используется выражение искусственной механической характеристики путем подстановки координат заданной точки  $\omega = \omega_{зад}$  и  $M = M_{зад}$ :

$$\omega = \frac{U_n}{k\Phi} - M \frac{R_{доб} + r_{я}}{k\Phi}. \quad (E.1)$$

Если заданная точка находится ниже естественной характеристики, принимают  $k\Phi = k\Phi_n$  и решают уравнение (E.1) 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 (E.1) 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.

**Е.1.2.** Для двигателя последовательного возбуждения расчет сопротивлений в цепи якоря для обеспечения работы в заданной точке выполняют по формуле искусственной характеристики:

$$\omega_u = \omega_e \frac{U_n - I(r_{я} + r_{ов} + R_{доб})}{U_n - I(r_{я} + r_{ов})}, \quad (E.2)$$

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

**Е.1.3.** Для асинхронного двигателя с фазным ротором расчет сопротивлений в цепи ротора для обеспечения работы в заданной точке наиболее

прост при использовании формулы соотношения скольжений и сопротивлений при постоянстве момента  $M = const$ :

$$\frac{S_e}{S_u} = \frac{r_2}{R_2}. \quad (E.3)$$

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  $\omega_u = \omega_{зад}$  и  $R_2$  рассчитывают по (E.3).

Расчет искусственной характеристики выполняют по той же формуле (E.3), только при известном  $R_2$  определяют  $S_u$  и  $\omega_u$  при различных моментах двигателя.

## Е.2. Питание двигателя от преобразователя

При питании двигателя от преобразователя напряжение (и частота) регулируются плавно. Определение напряжения (частоты), необходимых для работы двигателя в заданной точке, сводится к уточнению возможности обеспечения преобразователем уровня напряжения (частоты) при различных нагрузках и колебаниях напряжения питающей сети.

### Е.2.1. Расчет ЭДС преобразователя в системе ТП–Д при работе в заданной точке

При работе в системе ТП–Д 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 (13.12), и для трехфазной мостовой схемы выпрямления дополнительное сопротивление от обмоток трансформатора составляет

$$R_m = 2r_m. \quad (E.4)$$

Снижение выпрямленной ЭДС за счет коммутационных провалов учитываемая сопротивлением

$$R_{\mathcal{E}} = \frac{m \cdot x_m}{2\pi}, \quad (\text{E.5})$$

в котором эквивалентное индуктивное сопротивление фазы трансформатора рассчитывают по (13.13).

Падение напряжения на открытых тиристорах для трехфазной мостовой схемы составляет

$$\Delta U_{\mathcal{E}} = (1..2), B.$$

Выражение электромеханической характеристики двигателя в системе ТП–Д имеет вид

$$\omega = \frac{E_{d0} \cos \alpha - \Delta U_{\mathcal{E}} - I(r_{\text{я}} + R_m + R_{\mathcal{E}})}{k\Phi_H}. \quad (\text{E.6})$$

После подстановки  $\omega = \omega_{\text{зад}}$ ,  $I = I_{\text{зад}} = \frac{M_c}{k\Phi_H}$ , (E.7)

получают среднее значение выпрямленной ЭДС

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha \quad (\text{E.8})$$

и при необходимости –  $\cos \alpha$  (см. рисунок Е1).

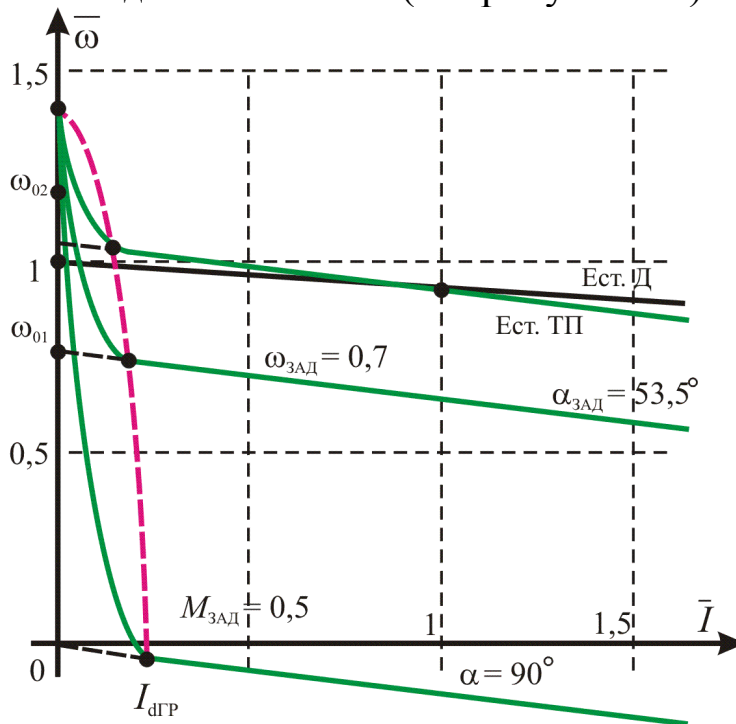


Рисунок Е1. Расчет характеристики в системе ТП – Д

Естественная электромеханическая характеристика системы ТП–Д проходит через точку  $(\omega_H, I_H)$  при напряжении

$$U_H = E_{d0} \cos \alpha_H.$$

При этом углу  $\alpha_n$  соответствует напряжение управления  $U_{yn}$  преобразователем. В документации на тиристорные преобразователи зачастую не приводится его регулировочная характеристика, поэтому базовое напряжение управления преобразователем принимают  $U_{yб} \approx 5\text{В}$  при номинальном выходном напряжении преобразователя. Коэффициент усиления ТП определяют

$$k_{mn} = \frac{U_n}{U_{yб}} . \quad (\text{E.9})$$

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 (E.6) 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

$$I_{zp} = \frac{E_{d0} \cdot \sin \alpha}{2\pi \cdot f_{1n} (2L_T + L_{я} + L_p)} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m}\right) . \quad (\text{E.10})$$

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

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

### **Е.2.2. 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  $p_n$ :

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p_n} . \quad (\text{E.11})$$

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  $U/f = const$ . При таком законе (если  $r_1=0$ ) максимальный момент постоянен  $M_k \cong const$  и не зависит от частоты. Также не зависит от частоты

$$\Delta\omega_k = \omega_0 - \omega_k \approx const.$$

Это позволяет для приближенных расчетов ( $r_1=0$ ) 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,

$$\omega_{озад} = \omega_{зад} + \Delta\omega_e, \quad (E.12)$$

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

Частота напряжения в заданной точке

$$f_{1зад} = \frac{\omega_{озад}}{\omega_{он}} \cdot f_{1н} = \alpha \cdot f_{1н}, \quad (E.13)$$

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

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

Напряжение на статоре можно определить из формулы (Д.17)

$$U_{1зад} = \sqrt{\frac{2M_k \alpha \omega_{он} (r_1 + \sqrt{r_1^2 + (\alpha x_k)^2})^2}{3}}, \quad (E.14)$$

принимая для обеспечения перегрузочной способности двигателя

$$M_k = (2 \div 3) M_{зад}. \quad (E.15)$$

Относительное напряжение

$$\gamma = U_{1зад} / U_{фн}. \quad (E.16)$$

При законе регулирования амплитуды напряжения пропорционально частоте  $U/f = const$ , относительное значение напряжения на статоре  $\gamma$  равно относительному значению 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 (см. п. Е2.4). В связи с тем, что

$f_{1зад}$  и  $U_{1зад}$  были определены приближенно ( $r_l \approx 0$ ), 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  $r_l$ . 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.

### Е.2.3. Расчет частоты и тока статора двигателя в системе источник тока – асинхронный двигатель (ИТ-АД)

При работе двигателя в режиме частых пусков и торможений большое значение имеют условия формирования пусковых и тормозных моментов. Механические характеристики асинхронного двигателя при питании от преобразователя частоты, работающего в режиме автономного источника напряжения, существенно снижают критический момент в зоне малых частот. Здесь существенно влияет активное сопротивление обмотки фазы статора  $r_1$ . Для увеличения момента в зоне малых частот приходится повышать напряжение на статоре.

Для устранения влияния активного сопротивления обмотки статора применяют питание двигателя от автономного источника тока, в качестве которого могут быть использованы различные схемы [7]. К ним относятся индуктивно - емкостный источник тока, тиристорный преобразователь частоты с глубокой отрицательной обратной связью по току.

При питании статора двигателя от источника тока величина тока статора не зависит от нагрузки двигателя, а определяется лишь управляющим воздействием.

Для предварительной оценки частоты тока статора может быть использован параллельный перенос естественной характеристики в точку  $\omega_{зад}$ ,  $M_{зад2}$ .

Частота тока статора  $f_{1зад}$  рассчитывается по (Е.13), а синхронная скорость – по (Е.12).

Величина критического момента  $M_{км}$  при питании от источника тока не зависит от активного сопротивления статора:

$$M_{км} = \frac{3I_1^2 \cdot x_\mu^2}{2\omega_{0н} (x_2' + x_\mu)} \quad (Е.18)$$

Для предварительного расчета принимают  $M_{км} = (2...3)M_{зад}$ , обеспечивая этим перегрузочную способность двигателя, и определяют величину тока статора

$$I_{1зад} = \sqrt{\frac{2M_{км} \cdot \omega_{он}(x_{\mu} + x'_{2})}{3x_{\mu}^2}}. \quad (E.19)$$

Механические характеристики строят по формуле

$$M = \frac{2M_{км}}{\frac{\alpha S}{\alpha S_{км}} + \frac{\alpha S_{км}}{\alpha S}}, \quad (E.20)$$

где

$$\alpha S = \frac{(\omega_{зад} - \omega)}{\omega_{он}};$$

$$\alpha S_{км} = \frac{r'_2}{x'_2 + x_{\mu}};$$

$\omega_{зад} = \alpha \omega_{он}$  – синхронная скорость двигателя при заданной частоте;

$\alpha S_{к}$  – критическое абсолютное скольжение;

$\alpha S$  – текущее значение абсолютного скольжения.

Электромеханические характеристики при  $I_1 = \text{const}$  строят по закону распределения токов в параллельных цепях [7]:

$$I_{\mu} = I_1 \sqrt{\frac{(R'_2 / \alpha S)^2 + (x'_2)^2}{(R'_2 / \alpha S)^2 + (x_{\mu} + x'_2)^2}}. \quad (E.23)$$

$$I'_2 = \frac{I_1 \cdot x_{\mu}}{\sqrt{(R'_2 / \alpha S)^2 + (x_{\mu} + x'_2)^2}}; \quad (E.24)$$

Расчет характеристик при питании от источника тока может быть выполнен на ЭВМ по программе *harad* (см. приложение П). В результате расчета уточняют значение частоты тока статора, обеспечивающей работу двигателя в заданной точке, и получают распечатку таблиц или графиков рассчитанных характеристик.

#### Е.2.4. Основные соотношения для асинхронного двигателя при частотном управлении [9]

Для расчета используется Т – образная схема замещения асинхронного двигателя. Приведенные выражения получены путем решения комплексных уравнений, записанных для Т – образной схемы. (В программе «harad» эти уравнения решаются программой).

Относительная частота статора

$$\alpha = f_1 / f_{1н.}$$

Относительное напряжение

$$\gamma = U_{\phi} / U_{\phiн.}$$

Абсолютное скольжение или относительная частота тока ротора

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

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

Коэффициенты рассеяния

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

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

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

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

$m_1$  – число фаз статора.