

## ЧАСТЬ III

# СТАТИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ

## Глава 7

### Статическая устойчивость энергосистем

#### § 7.1. Статическая устойчивость синхронного генератора

Оценка статической устойчивости синхронного генератора, включенного на шины энергосистемы (рис. 7.1), может быть выполнена при помощи второго закона Ньютона для вращающегося тела

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_B - M_C, \quad (7.1)$$

где  $M_B$  – вращающий момент на валу энергетического двигателя, кг·м;  $M_C$  – момент сопротивления (тормозной момент) на валу генератора, кг·м;  $\omega$  – угловая частота вращения вала агрегата, с<sup>-1</sup>;

$J = \frac{GD^2}{4g}$  – момент инерции, кг·м·с<sup>2</sup>;  $GD^2$  – маховые массы вращающихся частей, присоединенные к валам энергетического двигателя и генератора, кг·м<sup>2</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение земного притяжения.

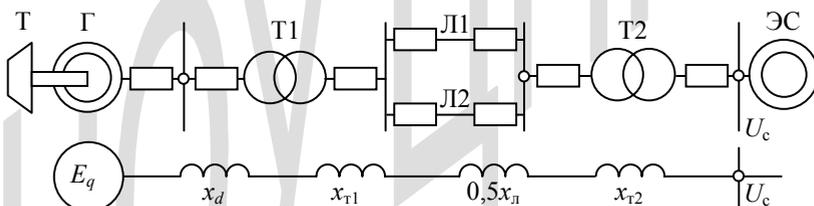


Рис. 7.1. Схема электропередачи мощности от синхронного генератора в энергосистему и ее схема замещения:

Т – турбина; Г – генератор; Т1 – трансформатор подстанции;  
Л1, Л2 – линии электропередачи; Т2 – трансформатор связи с энергосистемой; ЭС – энергосистема

Статическая устойчивость синхронного агрегата оценивается при постоянной синхронной частоте вращения, при которой мощности на валу энергетического двигателя и синхронного генератора пропорциональны моментам, а в относительных единицах равны, т. е.

$$P_T = M_B, \text{ о. е.}; P_T = M_C, \text{ о. е.}$$

Статическая устойчивость оценивается при относительном движении ротора агрегата, т. е. при перемещении ротора относительно вектора вращающегося электромагнитного поля статора генератора (рис. 7.2), при изменении угла вылета ротора  $\theta$ . Скорость его изменения соответствует производной

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}.$$

При относительном движении ротора генератора уравнение движения (7.1) можно представить в следующем виде:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_T - P_G. \quad (7.2)$$

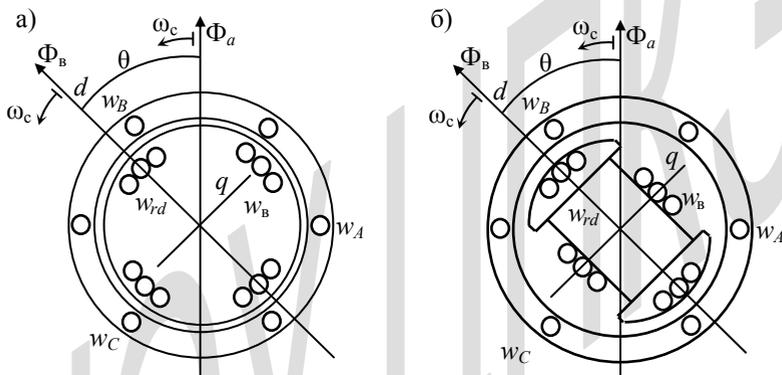


Рис. 7.2. Принципиальные конструктивные схемы синхронных генераторов:  
а – неявнополюсный; б – явнополюсный

Это уравнение – уравнение динамического равновесия, ибо при равенстве  $P_T = P_G$  угол вылета ротора  $\theta$  имеет постоянную величину. Если равенства мощностей нет, то имеет место либо ускорение агрегата при  $P_T > P_G$ , либо замедление при  $P_T < P_G$ , т. е. по знаку разности мощностей можно судить о характере движения вала агрегата. Поэтому целесообразно уравнение (7.2) использовать в таком виде

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_T - P_G = \pm \Delta P. \quad (7.3)$$

где  $\Delta P$  - избыточная мощность.

Характеристика мощности энергетического двигателя в координатах  $P, \theta$  является прямой линией, так как мощность, развиваемая двигателем, не зависит от угла вылета ротора.

Характеристика мощности синхронного генератора в координатах  $P, \theta$  представляется синусоидальной угловой характеристикой (рис. 7.3), получаемой из векторной диаграммы:

для неявнополюсной машины (турбогенератора)

$$P_T = \frac{U_c E_q}{x_{d\Sigma}} \sin \theta; \quad (7.4)$$

для явнополюсной машины (гидрогенератора)

$$P_T = \frac{U_c E_q}{x_{d\Sigma}} \sin \theta + \frac{(x_d - x_q) U_c^2}{2x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\theta_0, \quad (7.5)$$

где  $x_{d\Sigma}, x_{q\Sigma}$  – сопротивления генераторов в продольной и в поперечной осях с учетом сопротивлений схемы замещения (см. рис. 7.1)

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + 0,5x_{L1} + x_{T2};$$

$$x_{q\Sigma} = x_q + x_{T1} + 0,5x_{L1} + x_{T2}.$$

На рис. 7.3 показаны характеристики турбины и генератора. Характеристики имеют две точки взаимного пересечения 1 и 2. В соответствии с положением теоретической механики в точках пересечения характеристик энергетического двигателя и приводного механизма возможен их совместный режим.

Устойчивость агрегата в этих точках определяется по уравнению (7.3).

Рассматриваем режим в точке 1. Предположим, что угол вылета генератора  $\theta_0$  получил малое приращение  $+\Delta\theta$ .

В этом случае равновесие мощности на валу агрегата нарушено:  $P_T > P_G$  и знак минус избыточной мощности ( $-\Delta P$ ) свидетельствует о том, что появилась тормозная сила, возвращающая агрегат в прежний режим.

Если появилось малое приращение угла  $-\Delta\theta$ , то из графика рис. 7.3 видно, что теперь  $P_T > P_G$ : избыточная мощность со знаком

«+»  $+\Delta P$  свидетельствует о появлении ускоряющей силы, возвращающей агрегат в прежний режим при значении угла  $\theta_0$ .

Таким образом, движение синхронного агрегата в точке 1 статически устойчиво.

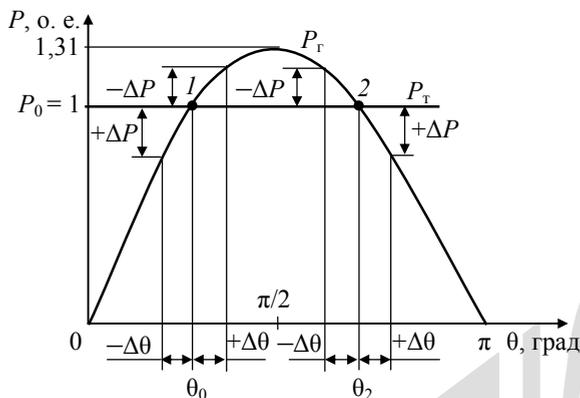


Рис. 7.3. Угловая характеристика синхронного турбогенератора при выдаваемой мощности через электропередачу в энергосистему

Рассмотрим режим в точке 2. Предположим, что угол вылета ротора генератора  $\theta_2$  получил малое приращение  $-\Delta\theta$ , т. е. стал затормаживаться. В этом случае, как видно из рис. 7.3, избыточная мощность появляется со знаком «-», что свидетельствует о появлении тормозящей силы, нарастающей по мере движения ротора к значению угла  $\theta_0$ . По достижении этого угла, после ряда колебаний агрегат оказывается в статически устойчивом режиме. При отклонении ротора от угла  $\theta_2$  на малое приращение  $+\Delta\theta$  появляется избыточная мощность  $+\Delta P$ , что свидетельствует о появлении ускоряющей силы, которая будет возрастать с увеличением приращения угла  $\Delta\theta$  и при значении угла более  $180^\circ$  приведет к выходу генератора из синхронизма.

Режим синхронного агрегата в точке 2 статически неустойчив: либо агрегат переходит в устойчивый режим, либо выходит из синхронизма.

Подобный анализ статической устойчивости можно провести и для синхронного явнополюсного генератора и получить такие же

выводы: в точке 1 – движение агрегата статически устойчиво, а в точке 2 – статической устойчивости нет.

*Средства повышения статической устойчивости  
синхронного генератора*

Если сравнить угловые характеристики синхронных генераторов на рис. 7.4, то можно утверждать, что угловой характеристике с большей амплитудой, с точки зрения статической устойчивости, следует отдать предпочтение. Следовательно, для повышения статической устойчивости генератора необходимо увеличивать амплитуду характеристики

$$P_T = \frac{U_c E_q}{x_{d\Sigma}}$$

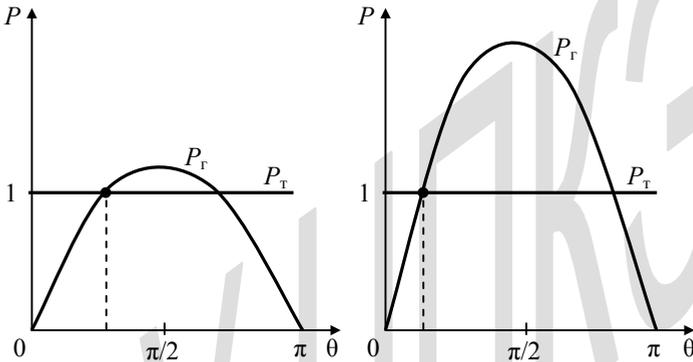


Рис. 7.4. Угловые характеристики синхронных генераторов с различными амплитудами

Знаменатель  $x_{d\Sigma}$  состоит из суммы сопротивлений электропередачи. Применительно к рис. 7.1 она равна

$$x_{d\Sigma} = x_d + x_{T1} + 0,5x_d + x_{T2}.$$

Если принять величину сопротивления  $x_{d\Sigma}$  за 100 %, то соотношение отдельных составляющих будет приблизительно таким:  $x_d$  – 60 %,  $x_{T1}$ ,  $x_{T2}$  – по 10 % и  $0,5x_d$  – 20 % [28].

Наибольшую долю в суммарном сопротивлении имеет синхронное продольное сопротивление генератора  $x_d$ . Если предложить уменьшить это сопротивление, то оказывается, что сделать это возможно только для гидрогенераторов, проектирование и изготовление

которых целенаправленно для конкретной гидростанции, работающей на «дальнюю» линию электропередачи.

Электромашиностроительные заводы изготавливают генераторы, руководствуясь экономическим критерием: минимум затрат материалов и труда на единицу установленной мощности.

Предложение изготовить генераторы с меньшим значением  $x_d$  приводит к увеличению габаритов машины и, естественно, стоимость генератора возрастает. Так, при изготовлении гидрогенератора с уменьшенным значением  $x_d$  в два раза, стоимость машины возрастает на 30 % [28].

Второй величиной по значимости в суммарном сопротивлении электропередачи  $x_{d\Sigma}$  является сопротивление линии электропередачи  $x_{л}$ . Это сопротивление, приведенное к напряжению генератора, вычисляется так

$$x_{л} = x_{уд} l \left( \frac{U_c}{U_{л}} \right)^2, \quad (7.6)$$

где  $x_{уд}, l$  – соответственно удельное сопротивление линии, Ом/км, протяженность линии, км;  $U_c, U_{л}$  – соответственно напряжение на шинах системы и напряжение линий электропередачи, кВ.

Уменьшение  $x_{л}$  за счет большего напряжения на линии ведет к увеличению амплитуды угловой характеристики (пропускной способности электропередачи), и повышает статическую устойчивость генератора.

Амплитуда угловой характеристики увеличивается также автоматическим регулятором возбуждения (АРВ) и форсировкой возбуждения.

На рис. 7.5 представлена векторная диаграмма генератора, на которой векторы с индексами «1» отражают установившийся режим генератора. При увеличении нагрузки напряжение генератора, не имеющего АРВ, вследствие реакции статора будет уменьшаться (рис. 7.5, а).

При наличии АРВ-СД напряжение генератора будет поддерживаться постоянным при увеличении тока возбуждения, т. е. благодаря увеличению ЭДС  $E_q$  (рис. 7.5, б).

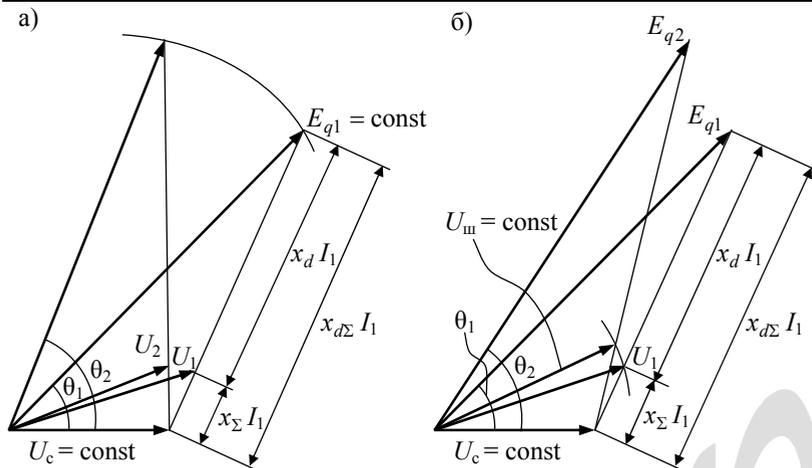


Рис. 7.5. Векторные диаграммы синхронного генератора ТВВ–200–2, иллюстрирующие действие автоматического регулятора возбуждения: а – генератор без АРВ; б – генератор с АРВ.

$E_{q1} = 2,75$  о. е.;  $E_{q2} = 3,03$  о. е.;  $x_{d\Sigma} = x_d + x_{\Sigma} = 2,09$  о. е.;  $x_d = 1,7$  о. е.;  
 $x_{\Sigma} = x_{r1} + x_{rl} + x_{r2} = 0,39$  о. е.

Таким образом, автоматический регулятор возбуждения является средством повышения статической устойчивости генератора [28].

## § 7.2. Статическая устойчивость синхронного электродвигателя

Принципиальная схема питания синхронного электродвигателя показана на рис. 7.6.

Из векторной диаграммы электродвигателя, представленной на рис. 7.7, выводится формула угловой характеристики

$$P_d = \frac{U_c E_q}{x_{d\Sigma}} \sin \theta + \frac{x_d - x_q}{2x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} U_c^2 \sin 2\theta, \quad (7.7)$$

где  $U_c$ ,  $E_q$  – соответственно напряжение на шинах подстанции и синхронная ЭДС электродвигателя;  $x_{d\Sigma}$ ,  $x_{q\Sigma}$  – суммарные индуктивные сопротивления в цепи питания электродвигателя.

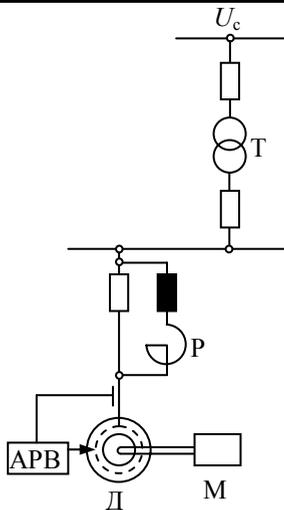


Рис. 7.6. Принципиальная схема питания синхронного электродвигателя

Угловая характеристика явнополюсного синхронного электродвигателя, как видно из формулы (7.7), состоит из двух частей: одна часть представляет собой полуволну синусоиды угла  $\theta$ , а вторая часть – синусоиду двойного угла  $\theta$ .

Графики этой характеристики построены на рис. 7.8.

Статическая устойчивость двигателя оценивается также, как у генератора, при перемещении ротора относительно вектора вращающегося электромагнитного поля статора (рис. 7.9) для отклонения угла вылета ротора  $\theta$  на малую величину  $\Delta\theta$ .

Поэтому оценка статической устойчивости синхронного двигателя производится также при помощи уравнения динамического равновесия, подобного (7.3),

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = P_d - P_m = \pm \Delta P, \quad (7.8)$$

где  $P_d, P_m$  – соответственно мощность (вращающий момент) на валу синхронного двигателя, мощность (тормозной момент) на валу рабочего механизма.

Зависимость  $P_m(\theta)$  на рис. 7.8 представляет собой для любого рабочего механизма прямую линию, так как при постоянной скорости вращения  $\omega_c$  момент сопротивления механизма также является постоянной

величиной, не зависимой от положения ротора двигателя в пространстве относительно вращающегося вектора магнитного поля.

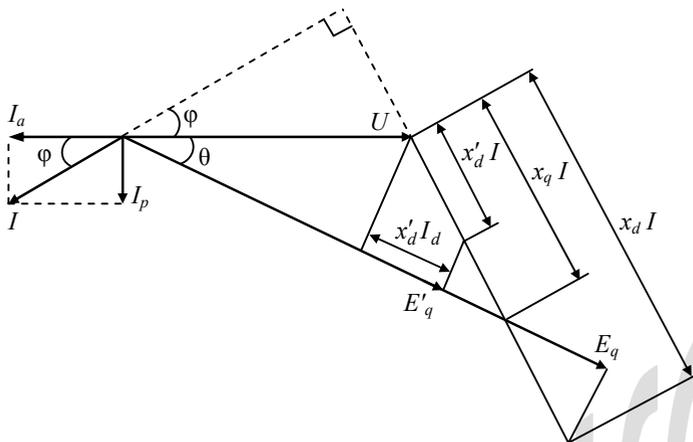


Рис. 7.7. Векторная диаграмма синхронного электродвигателя СДН 17–59–10:  
 $P = 4000$  кВт;  $S = 4620$  кВ·А;  $\cos \varphi = 0,866$ ;  $U = 6$  кВ;  $\eta = 96,6$ ;  $I = 445$  А;  
 $n = 600$  об/мин;  $x_d = 1,2$ ;  $x'_d = 0,4$ ;  $x''_d = 0,2$ ;  $x_q = 0,7$ ;  $x''_q = 0,2$ ;  $x_2 = 0,21$ ;  $x_0 = 0,1$ ;  
 $T_{d0} = 5,6$  с;  $T'_d = 1,3$  с;  $T''_d = 0,02$  с;  $J = 11,5$  т·м<sup>2</sup>;  $\varphi = 30^\circ$ ;  $\theta = 24,2^\circ$

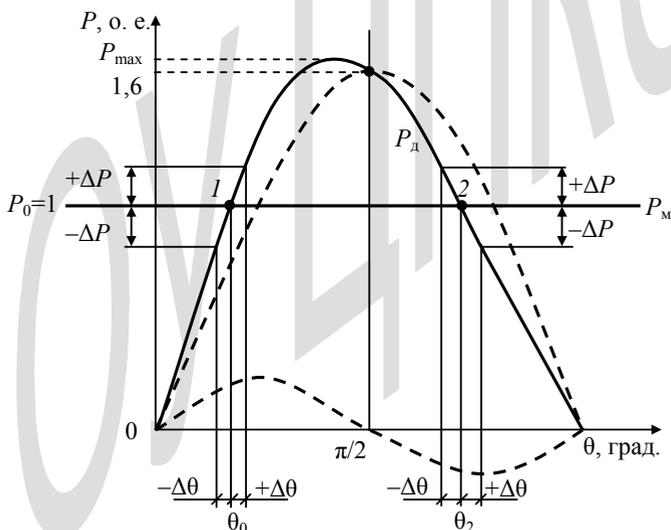


Рис. 7.8. Угловая характеристика синхронного электродвигателя ( $P_d$ ) и характеристика механизма ( $P_m$ )

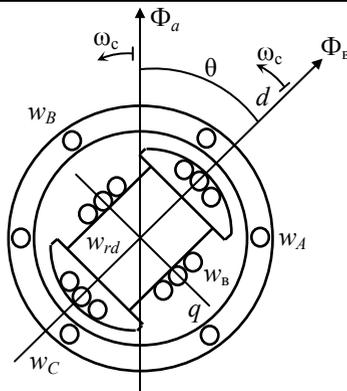


Рис. 7.9. Принципиальная конструктивная схема явнополюсного синхронного электродвигателя

В точках пересечения этих характеристик 1 и 2 имеет место совместный режим, но следует установить в какой точке будет статическая устойчивость.

Рассматриваем режим в точке 1. Предположим, что угол вылета ротора двигателя  $\theta_0$  получил малое приращение  $+\Delta\theta$ , т. е. ротор начал затормаживаться (см. рис. 7.9). Равновесие между  $P_d$  и  $P_m$  будет нарушено:  $P_d > P_m$  – избыточная мощность будет положительна, что свидетельствует о появлении ускоряющей силы, препятствующей торможению ротора, и последний будет возвращен в режим точки 1. Наоборот, если угол вылета ротора  $\theta$  получил малое приращение  $-\Delta\theta$ , т. е. ротор стал ускоряться (см. рис. 7.9). В этом случае оказывается  $P_m > P_d$  (см. рис. 7.8). Избыточная мощность будет иметь отрицательное значение, что свидетельствует о появлении затормаживающей силы, возвращающей ротор в исходное положение – в точку 1.

Движение двигателя в точке 1 статически устойчиво.

Рассмотрим режим в точке 2. Предположим, что ротор переместился на малое приращение  $-\Delta\theta$ . В этом случае, как видно из графиков, мощность двигателя  $P_d$  оказываем больше мощности механизма  $P_m$ . Избыточная мощность имеет положительный знак, и угол вылета будет уменьшаться под действием избыточной мощности, пока не примет значение  $\theta_0$ , при котором положение ротора двигателя будет устойчивым.

Если малое приращение угла в точке 2 будет  $+\Delta\theta$ , то избыточная мощность принимает отрицательную величину, свидетельствующую о появлении тормозной силы, которая по мере удаления ротора от уг-

ла  $\theta_2$  будет увеличиваться и вызовет выход двигателя из синхронизма. Таким образом, в точке 2 движение двигателя статически неустойчиво.

Для повышения статической устойчивости синхронного двигателя служит автоматический регулятор возбуждения, который наряду с другими функциями обеспечивает увеличение тока возбуждения при возрастании нагрузки и тем самым увеличивает амплитуду угловой характеристики. Коэффициент запаса статической устойчивости двигателя возрастает

$$k_c = \frac{P_{\max} - P_0}{P_0}. \quad (7.9)$$

### § 7.3. Статическая устойчивость асинхронного электродвигателя

Принципиальная схема питания асинхронного электродвигателя показана на рис. 7.10.

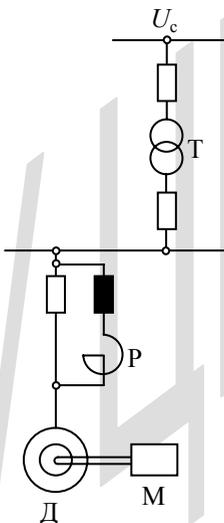


Рис. 7.10. Принципиальная схема питания асинхронного электродвигателя

Оценка статической устойчивости двигателя производится при помощи уравнения динамического равновесия

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_m = \pm \Delta M. \quad (7.10)$$

Это уравнение может быть выражено в относительных единицах так

$$T_{\text{э}} \frac{dn}{dt} = m_d - m_m = \pm \Delta m, \quad (7.11)$$

где  $T_{\text{э}} = \frac{(GD_d^2 + GD_m^2) n_{\text{НОМ}}^2}{365 P_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}$  – электромеханическая постоянная време-

ни электропривода, с;  $GD_d^2, GD_m^2$  – соответственно маховые моменты вращающихся частей двигателя и рабочего механизма,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $n_{\text{НОМ}}$  – номинальная частота вращения двигателя, об/мин;  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность двигателя, МВт;  $m_d = \frac{M_d}{M_{\text{НОМ}}}$ ,  $m_m = \frac{M_m}{M_{\text{НОМ}}}$  – соответственно вращающий момент на валу двигателя и момент сопротивления рабочего механизма, о. е.;  $\Delta m = \frac{\Delta M}{M_{\text{НОМ}}}$  – избыточный момент, о. е.

Знак избыточного момента определяет силу либо ускоряющую электропривод (знак «+»), либо тормозящую его (знак «-»).

Вращающий момент двигателя описывается формулой Клосса\*

$$m_d = \frac{2m_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}} \left( \frac{U}{f} \right)^2 \quad (7.12)$$

или более точным выражением [29]

$$m_d = \frac{2m_{\text{max}}(1 + \varepsilon_d)}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s}{s_{\text{кр}}} + 2\varepsilon_d} \left( \frac{U}{f} \right)^2, \quad (7.12, a)$$

где поправка  $\varepsilon_d = \frac{r_1}{r_2'} s_{\text{кр}}$  может быть вычислена по формуле

$$\varepsilon_d = \frac{m_{\text{пуск}}(1 + s_{\text{кр}}^2) - 2m_{\text{max}}s_{\text{кр}}}{2s_{\text{кр}}(m_{\text{max}} - m_{\text{пуск}})}. \quad (7.13)$$

\* Kloss M. Drehmoment und Schlüpfung des Drehstrommotors. Archiv für elektrotechnik. BdV, 1916.

В формулах приводятся каталожные данные:  $m_{\max}$  – максимальный («опрокидывающий») момент;  $m_{\text{пуск}}$  – пусковой момент при  $s = 1$ ;  $s_{\text{кр}}$  – скольжение, соответствующее максимальному моменту.

Тормозной момент рабочего механизма в общем случае представляется зависимостью

$$m_c = m_{\text{нач}} + \Delta m n^p, \text{ о. е.} \quad (7.14)$$

где  $m_{\text{нач}}$  – начальный момент сопротивления (момент «трогания»);  $\Delta m = m_y - m_{\text{нач}}$  – разность между тормозным моментом установившегося режима и начальным моментом;  $n$  – скорость вращения,  $p = 2$  – для центробежных механизмов (вентиляторов, насосов).

Для механизма с постоянным моментом на валу (транспортёры, эскалаторы) зависимость (7.14) будет иметь вид

$$m_c = \text{const.} \quad (7.15)$$

Графики вращающего момента двигателя по (7.12) с подстановкой  $s = 1 - n$  и тормозного момента механизма по (7.15) построены на рис. 7.11.

В точках пересечения этих характеристик 1 и 2 – возможен совместный режим электродвигателя и механизма.

Оценка устойчивости электропривода в этих точках выполняется при помощи уравнения динамического равновесия (7.11).

Предположим, что в точке 1 частота вращения электропривода получила малое приращение скорости  $+\Delta n$ . В этом случае, как следует из уравнения (7.11) и видно на рис. 7.11, возникает отрицательный избыточный момент  $-\Delta m$ , что свидетельствует об отрицательном ускорении – торможении электропривода, возвращающем режим в точку 1.

В случае отрицательного приращения скорости вращения  $-\Delta n$  появляется положительный избыточный момент  $+\Delta m$  и двигатель возвращается в режим точки 1.

Таким образом, движение асинхронного двигателя в точке 1 статически устойчиво.

Рассмотрим режим двигателя в точке 2. В случае малого приращения скорости  $+\Delta n$ , как следует из уравнения (7.11) и графиков рис. 7.11, появляется положительный избыточный момент  $+\Delta m$ , который вызовет увеличение скорости вращения двигателя, что приведет к увеличению избыточного момента и, в конечном счете, электродвигатель перейдет в режим точки 1. Теперь, если малое приращение в точке 2 имеет отрицательное значение, то, как видно на рис. 7.11, появляется отрицательный избыточный момент, который по мере затормаживания двигателя будет увеличиваться, пока двигатель не остановится.

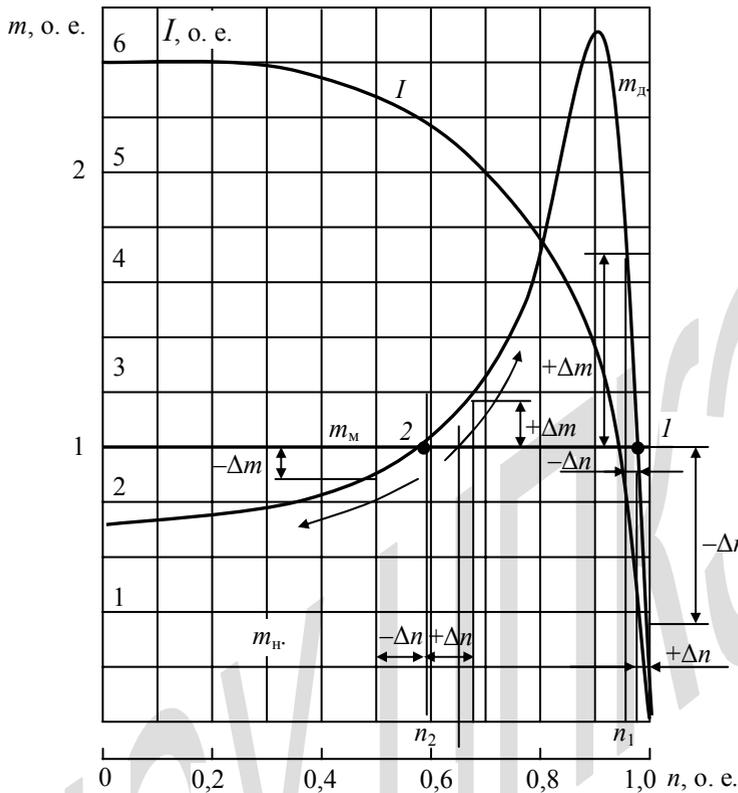


Рис. 7.11. Механическая характеристика ( $m_d$ ), характеристика потребляемого тока ( $I$ ) асинхронного двигателя АД 2000 и характеристика рабочего механизма ( $m_m$ )

Таким образом, движение двигателя в точке 2 статически неустойчиво: либо двигатель переходит в статически устойчивый режим, либо останавливается.

Уравнение динамического равновесия (7.11) позволяет анализировать движение электропривода при любом виде взаиморасположения характеристик моментов. Например, на рис. 7.12 показано пересечение характеристик в точке 3. Положим, что появилось малое положи-

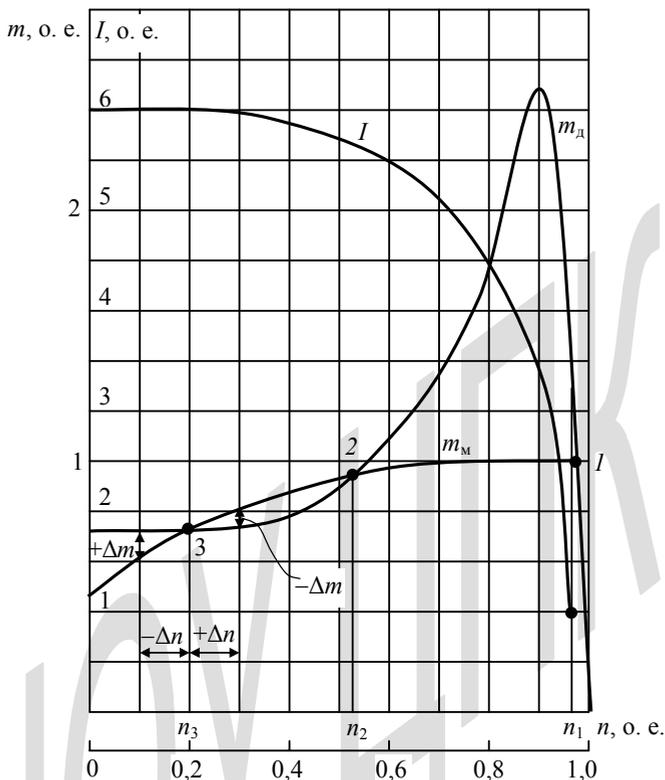


Рис. 7.12. Механические характеристики асинхронного электродвигателя и рабочего механизма

тельное приращение скорости  $+\Delta n$ . Это приведет к появлению отрицательного избыточного момента, который вернет двигатель в точку 3.

При отрицательном приращении скорости  $-\Delta n$  появляется положительный момент  $+\Delta m$  и двигатель вернется в точку 3.

Таким образом, движение двигателя в точке 3 статически устойчиво.

Следует отметить, что при пуске двигателя с такой характеристикой механизма двигатель «застрянет» в точке 3 и в этом режиме ток, потребляемый двигателем, будет практически равен пусковому (см. рис. 7.12). Такая величина тока вызовет быстрый нагрев электродвигателя, а с другой стороны, при частоте вращения  $n_3$ , производительность вентилятора двигателя (крыльчатка которого находится на валу) уменьшится пропорционально частоте вращения  $Q = n_3$  и отвод тепла резко сократится – все это приведет к быстрому перегреву электродвигателя и, если он не будет отключен, – к сгоранию его изоляции обмоток.