

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; ω – угловая частота вращения вала агрегата, с⁻¹;

$J = \frac{GD^2}{4g}$ – момент инерции, кг·м·с²; GD^2 – маховые массы вращающихся частей, присоединенные к валам энергетического двигателя и генератора, кг·м²; $g = 9,81$ м/с² – ускорение земного притяжения.

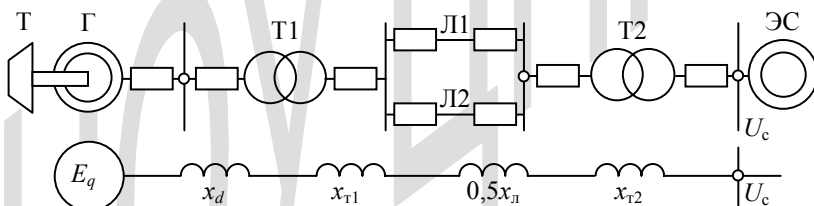


Рис. 7.1. Схема электропередачи мощности от синхронного генератора в энергосистему и ее схема замещения:

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 θ . Скорость его изменения соответствует производной

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

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

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

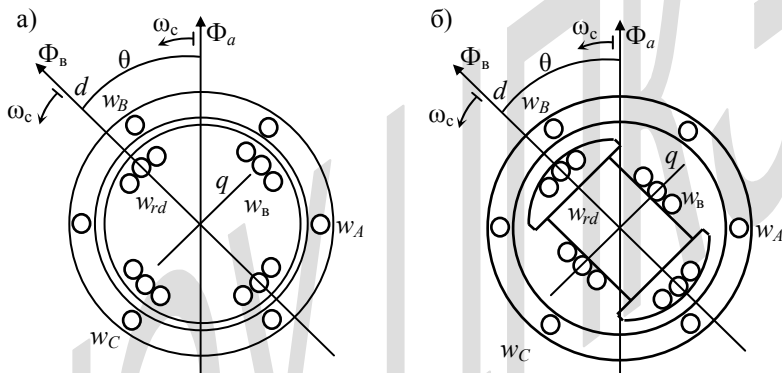


Рис. 7.2. Принципиальные конструктивные схемы синхронных генераторов:
а – неявнополюсный; б – явнополюсный

Это уравнение – уравнение динамического равновесия, ибо при равенстве $P_T = P_G$ угол вылета ротора θ 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 ΔP - избыточная мощность.

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

Характеристика мощности синхронного генератора в координатах P, θ 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 θ_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 θ_0 .

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

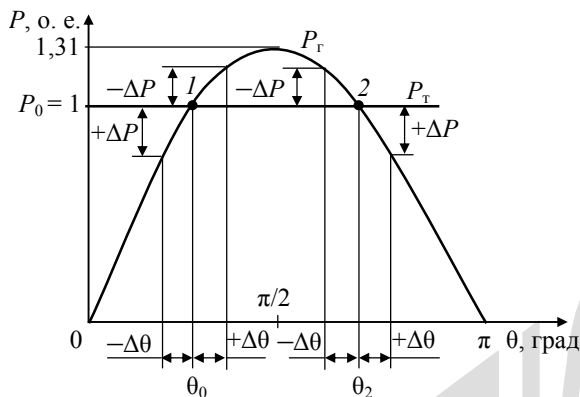


Рис. 7.3. Угловая характеристика синхронного турбогенератора при выдаваемой мощности через электропередачу в энергосистему

Рассмотрим режим в точке 2. Предположим, что угол вылета ротора генератора θ_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 θ_0 . По достижении этого угла, после ряда колебаний агрегат оказывается в статически устойчивом режиме. При отклонении ротора от угла θ_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° 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

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

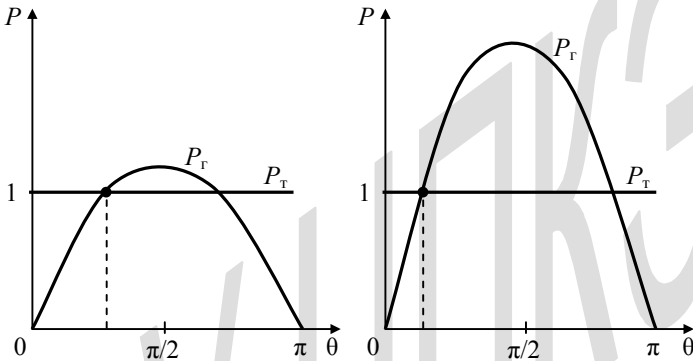


Рис. 7.4. Угловые характеристики синхронных генераторов с различными амплитудами

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).

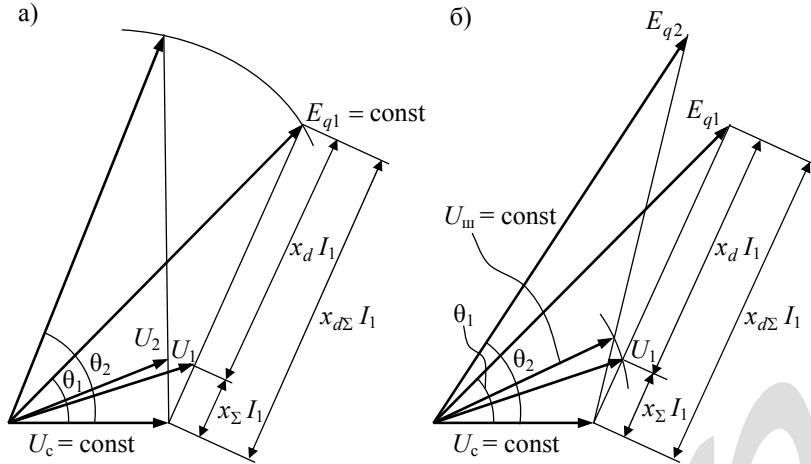


Рис. 7.5. Векторные диаграммы синхронного генератора ТВВ–200–2, иллюстрирующие действие автоматического регулятора возбуждения: а – генератор без АРВ; б – генератор с АРВ.

$E_{q1} = 2,75$ 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.

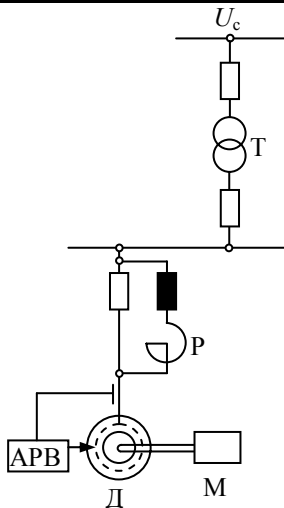


Рис. 7.6. Принципиальная схема питания синхронного электродвигателя

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

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 θ 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 ω_c момент сопротивления механизма также является постоянной

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

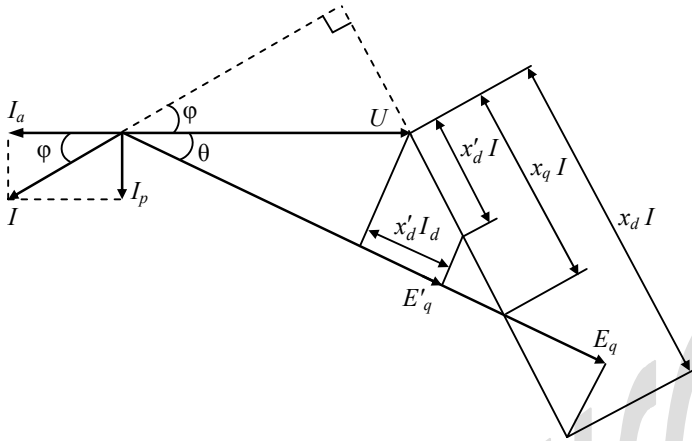


Рис. 7.7. Векторная диаграмма синхронного электродвигателя СДН 17–59–10:
 $P = 4000$ кВт; $S = 4620$ кВ·А; $\cos \varphi = 0,866$; $U = 6$ кВ; $\eta = 96,6$; $I = 445$ А;
 $n = 600$ об/мин; $x_d = 1,2$; $x'_d = 0,4$; $x''_d = 0,2$; $x_q = 0,7$; $x''_q = 0,2$; $x_2 = 0,21$; $x_0 = 0,1$;
 $T_{d0} = 5,6$ с; $T'_d = 1,3$ с; $T''_d = 0,02$ с; $J = 11,5$ т·м²; $\varphi = 30^\circ$; $\theta = 24,2^\circ$

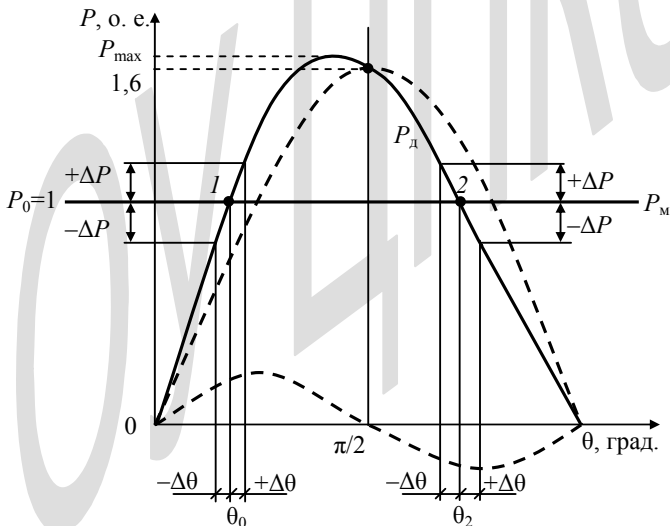


Рис. 7.8. Угловая характеристика синхронного электродвигателя (P_d) и характеристика механизма (P_m)

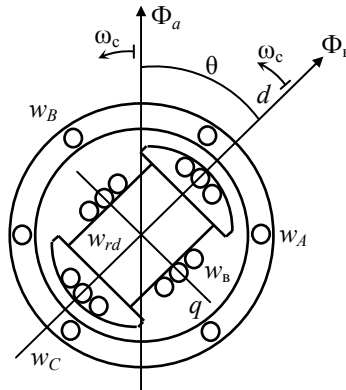


Рис. 7.9. Принципиальная конструктивная схема явнополюсного синхронного электродвигателя

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 θ_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 θ 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 θ_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 θ_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.

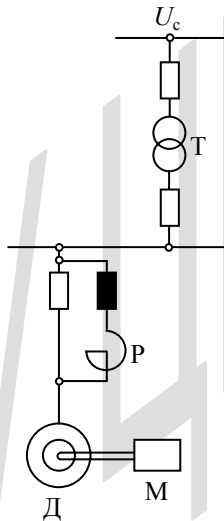


Рис. 7.10. Принципиальная схема питания асинхронного электродвигателя

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

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

где $T_{\omega} = \frac{(GD_d^2 + GD_m^2) n_{\text{НОМ}}^2}{365 P_{\text{НОМ}} \cdot 10^3}$ – 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.

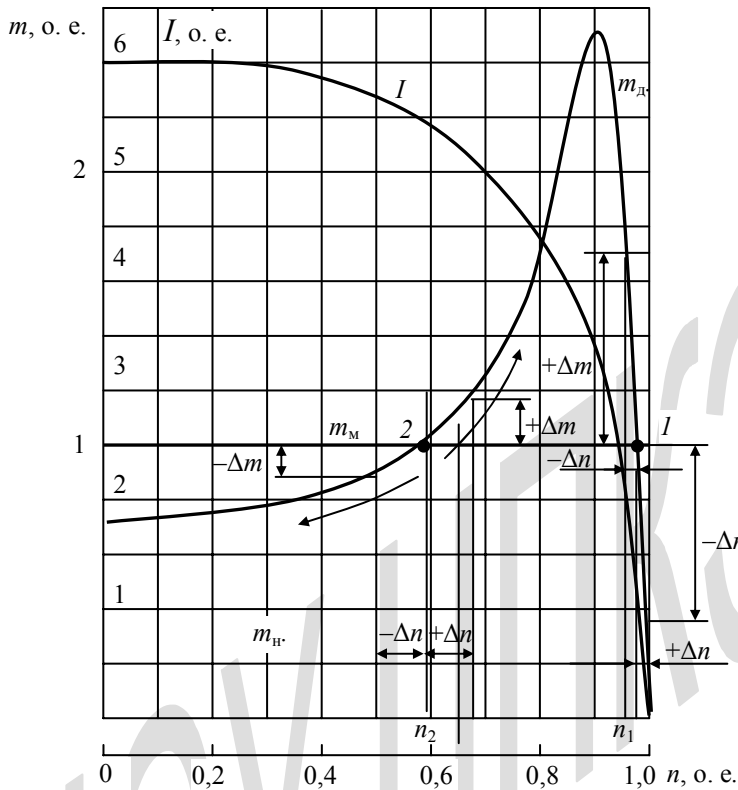


Рис. 7.11. Механическая характеристика (m_D), характеристика потребляемого тока (I) асинхронного двигателя АД 2000 и характеристика рабочего механизма (m_M)

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-

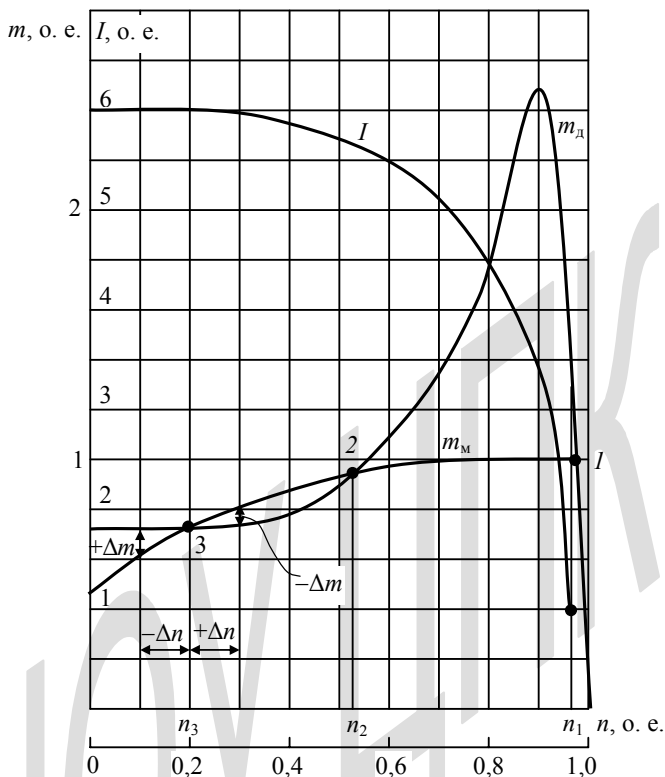


Рис. 7.12. Механические характеристики асинхронного электродвигателя и рабочего механизма

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.