

9.12. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости $P_1, I_1, \cos\varphi, \eta, s_1 = f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M = f(P_2)$ и I_2 или $I_2' = f(P_2)$ [6].

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 9.55). Г-образная схема получена из Т-образной схемы замещения (см. рис. 9.47), в которой ветвь, содержащая параметр Z_{12} , вынесена на вход схемы. Т-образная и Г-образная схемы идентичны для данной конкретной ЭДС, для которой рассчитывают комплексный коэффициент c_1 , равный взятому с обратным знаком отношению вектора напряжения фазы \dot{U}_1 к вектору ЭДС — \dot{E}_1 .

В асинхронных двигателях при изменении тока от синхронного холостого хода до номинального E_1 изменяется незначительно. Поэтому для получения рабочих характеристик коэффициент c_1 рассчитывают для синхронного холостого хода и принимают его значение неизменным. Это не вносит заметных погрешностей в расчет характеристик, так как значение коэффициента c_1 во всем диапазоне изменения нагрузки от $P_2 = 0$ до $P_2 = P_{2\text{ном}}$ изменяется лишь в третьем или четвертом знаке.

Корректировку коэффициента c_1 обычно производят лишь при расчете пусковых характеристик или режимов работы двигателя с большими скольжениями, при которых ток статора существенно превышает номинальный.

Для расчета рабочих характеристик коэффициент определяют из выражения

$$c_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_{12}} = c_1 e^{-j\alpha},$$

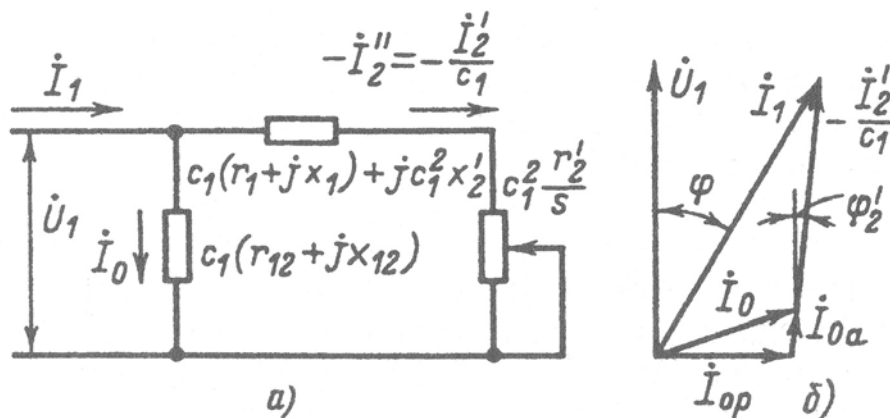


Рис. 9.55. Г-образная схема замещения асинхронной машины (а) и соответствующая ей векторная диаграмма (б)

где

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_2)}. \quad (9.222)$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2—3 кВт, как правило, $|\gamma| \leq 1^\circ$, поэтому реактивной составляющей коэффициента c_1 можно пренебречь, тогда приближенно

$$c_1 \approx c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \quad (9.223)$$

При более точных расчетах определяют и активную, и реактивную составляющие c_1 по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} c_{1a} &= \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}, \\ c_{1p} &= \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2}. \end{aligned} \right\} \quad (9.224)$$

Полное значение

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2}. \quad (9.225)$$

Как видно, выражение (9.223) может быть получено из (9.225) при условии $r_{12} \ll x_{12}$ и $r_1 \ll x_{12}$, что практически всегда имеет место в асинхронных машинах мощностью $P_2 \geq 2 \dots 3$ кВт. При этих же условиях $c_{1p} \approx 0$ и $c_{1a} = c_1$.

Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведен на язык программ при использовании в расчетах ЭВМ.

Аналитический метод расчета. В настоящее время практически все расчеты проводят аналитическим методом. Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 9.28 в удобной для ручного счета последовательности. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s \approx (0, 2 \dots 1, 5) s_{\text{ном}}$. Номинальное скольжение можно предварительно взять при $s_{\text{ном}} \approx r_2'$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы (см. пример расчета).

Перед началом расчета рекомендуется выписать значения постоянных, не зависящих от скольжения величин, как это показано в

формуляре и в примере расчета. К таким величинам относятся номинальное напряжение фазы $U_{1ном}$, сопротивления r_1 и r_2' , сумма потерь $P_{ст} + P_{мех}$ (для двигателей с фазным ротором также $P_{тр.ш}$) и составляющие тока синхронного холостого хода: реактивная $I_{0р} \approx I_\mu$ и активная, которую определяют из выражения

$$I_{0а} = \frac{P_{ст.осн} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_{1ном}} \quad (9.226)$$

Выписывается также значение коэффициента c_1 , определенное по (9.223) или по (9.225), и расчетные величины, обозначенные в формуляре a , a' , b и b' . Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1 .

Если $|\gamma| \leq 1^\circ$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае $c_{1р} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_1^2; & a &= c_1 r_1; \\ b' &= 0; & b &= c_1(x_1 + c_1 x_2'). \end{aligned} \right\} \quad (9.227)$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (9.224) и (9.225), то

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_{1а}^2 - c_{1р}^2; & a &= c_{1а} r_1 - c_{1р} x_1 - b' x_2'; \\ b' &= 2c_{1а} c_{1р}; & b &= c_{1а} x_1 + c_{1р} r_1 + a' x_2'. \end{aligned} \right\} \quad (9.228)$$

Расчет характеристик рекомендуется проводить в следующей последовательности.

Вначале находят активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления правой ветви схемы замещения (см. рис. 9.55):

$$Z_{ветви} = c_1(r_1 + jx_1) + jc_1^2 x_2' + c_1^2 \frac{r_2'}{s} = R + jX, \quad (9.229)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R &= c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s}; \\ X &= c_1 x_1 + c_1^2 x_2'. \end{aligned} \right\} \quad (9.229а)$$

Из (9.229) с учетом (9.227) или (9.228) получают

$$R = a' \frac{r_2'}{s} + a, \quad (9.230)$$

$$X = b; \quad (9.231)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (9.232)$$

Далее находят (см. рис. 9.55)

$$I_2'' = \frac{U_{1\text{ном}}}{Z}, \quad \cos\varphi_2' = R/Z \quad \text{и} \quad \sin\varphi_2' = X/Z.$$

Составляющие тока статора являются суммами активных и реактивных составляющих токов параллельных ветвей схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} I_{1a} &= I_{0a} + I_2'' \cos\varphi_2'; \\ I_{1p} &= I_{0p} + I_2'' \sin\varphi_2'. \end{aligned} \right\} \quad (9.233)$$

Полный ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (9.234)$$

Приведенный ток ротора

$$I_2' = c_1 I_2''. \quad (9.235)$$

Ход последующих расчетов ясен из приведенных формул в формуляре (табл. 9.30).

Т а б л и ц а 9.30. Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей

$$\begin{aligned} P_{\text{ном}} &= \dots; 2p = \dots; U_{1\text{ном}} = \dots \text{ В}; I_{1\text{ном}} = \dots \text{ А}; I_{0a} = \dots \text{ А}; \\ I_{0p} &\approx \underline{I}_\mu = \dots \text{ А}; P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} = \dots \text{ кВт}; \\ P_{\text{э.щ.ном}} &= \dots \text{ кВт}; r_1 = \dots \text{ Ом}; r_2' = \dots \text{ Ом}; c_1 = \dots; \\ a' &= \dots; a = \dots \text{ Ом}; b' = \dots \text{ Ом}; b = \dots \text{ Ом} \end{aligned}$$

№ п/п	Расчетная формула	Единицы величины	Скольжение			
			0,005	0,01	0,015	... $s_{\text{ном}}$
1	$a'r_2'/s$	Ом				
2	$b'r_2'/s$	Ом				
3	$R = a + a'r_2'/s$	Ом				
4	$X = b + b'r_2'/s$	Ом				
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом				
6	$I_2'' = U_{1\text{ном}}/Z$	А				
7	$\cos\varphi_2' = R/Z$	—				
8	$\sin\varphi_2' = X/Z$	—				
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos\varphi_2'$	А				
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin\varphi_2'$	А				
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А				
12	$I_2' = c_1 I_2''$	А				
13	$P_1 = 3U_{1\text{ном}} I_{1a} 10^{-3}$	кВт				

№ п/п	Расчетная формула	Единицы величины	Скольжение				
			0,005	0,01	0,015	...	$s_{ном}$
14	$P_{э1} = 3I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{э2} = 3(I_1^1)^2 r_2' 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{э.щ} \approx P_{э.щ.ном} (I_1 / I_{1ном})^*$	кВт					
17	$P_{доб} = 0,005 P_1$	кВт					
18	$\Sigma P = P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ} + P_{э1} + P_{э2} + P_{э.щ} + P_{доб}$	кВт					
19	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт					
20	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	—					
21	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—					

*Для двигателей с короткозамкнутым ротором $P_{э.щ.ном} = 0$.

После окончания расчета для принятых значений скольжения строится характеристика $s = f(P_2)$, по которой уточняется значение $s_{ном}$, соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2ном}$ (см. пример расчета на рис. 9.77), и заполняется последний столбец формуляра.

В приведенных формулах не учтено возможное изменение параметров при $s > s_{ном}$. Поэтому при расчете характеристик двигателей с двухклеточными короткозамкнутыми роторами или с роторами, имеющими фигурные пазы, в которых в повышенной степени проявляется действие эффекта вытеснения тока, для каждого из принятых значений скольжения, больших $s_{ном}$, необходимо уточнять значения параметров r_2' и x_2' (см. § 9.13).

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт приведены в примере расчета (см. § 9.16, рис. 9.74).

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме. Круговая диаграмма асинхронного двигателя изображена на рис. 9.56 [6]. Исходными данными для ее построения являются:

ток синхронного холостого хода I_0 , А,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}, \tag{9.236}$$

где I_{0a} — по (9.226); $I_{0p} \approx I_{\mu}$.

Коэффициент c_1 рассчитывают по (9.223) или по (9.225).

Сопротивления короткого замыкания

$$\left. \begin{aligned} x_{к1} &= x_1 + c_1 x_2'; \\ r_{к1} &= r_1 + c_1 r_2'. \end{aligned} \right\} \tag{9.237}$$

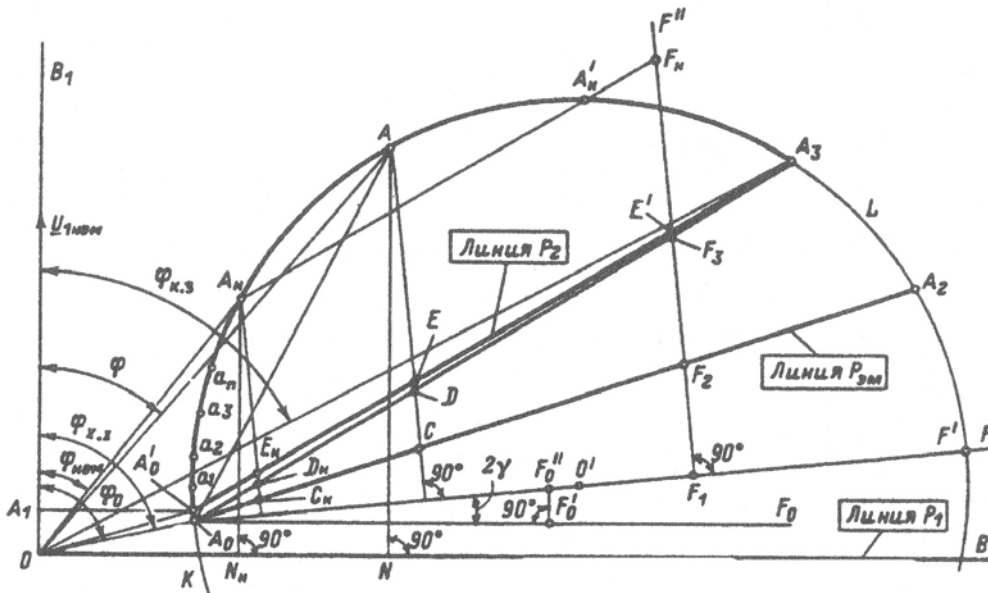


Рис. 9.56. Круговая диаграмма асинхронной машины

Чтобы размеры круговой диаграммы были удобны для работы, целесообразно вначале выбрать ее диаметр D_k (в пределах 200...250 мм), после чего рассчитать масштабы: масштаб тока, А/мм: $m_I = \frac{U_{\text{ном}}}{c_1 x_{k1} D_k}$; масштаб мощности, Вт/мм: $m_P = 3 U_{\text{ном}} m_I$, масштаб момента, Н·м/мм: $m_M = m_P / \Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi f_1}{P}$.

При построении диаграммы вектор напряжения $\dot{U}_{\text{ном}}$ направляют по оси ординат OB_1 . Из начала координат строят вектор тока синхронного холостого хода $OA_0 = \frac{1}{m_I} I_0$ под углом φ_0 к оси ординат $\varphi_0 = \arccos \frac{I_{0a}}{I_0}$. Точку A_0 удобно найти, отложив по вертикальной и горизонтальной осям ее координаты, соответственно равные I_{0a} и I_{0p} .

Через точку A_0 проводят линии $A_0F_0 \parallel OB$ и A_0F под углом 2γ к оси ординат. Из-за малости γ построение угла $\angle F_0A_0F$ удобно выполнять следующим образом. В произвольной точке F'_0 прямой A_0F_0 восстанавливают перпендикуляр к линии A_0F_0 и откладывают на нем отрезок

$$|F'_0 F''_0| = |A_0 F'_0| \operatorname{tg} 2\gamma \approx |A_0 F'_0| 2 \operatorname{tg} \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\eta_1 x_{12} - \eta_{12} x_1}{\eta_{12} (\eta_1 + \eta_{12}) + x_{12} (x_1 + x_{12})}.$$

Линия A_0F определяет положение диаметра круговой диаграммы. Отложив на ней отрезок $|A_0O'| = 0,5D_k$, проводят окружность с центром O' радиусом $0,5D_k$. Через произвольную точку F_1 диаметра A_0F' проводят линию $(F'_1 F_1) \perp (A_0F)$ и откладывают на ней

отрезки $|F_1F_2| = |A_0F_1| \frac{r_1}{x_{к1}}$ и $|F_1F_3| = |A_0F_1| \frac{r_{к1}}{x_{к1}}$. Через точку A_0 и точки F_2 и F_3 проводят прямые до пересечения их с окружностью соответственно в точках A_2 и A_3 . На оси ординат откладывают отрезок $|OA_1| = P_0/m_P$, где $P_0 = P_{ст} + 3I_0^2 r_1 + P_{мех}$, и через точку A_1 проводят $|A_1A'_0| \parallel BO$. Точку A'_0 соединяют с точками O и A_3 . На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

Окружность диаметром D_k и с центром O' является геометрическим местом концов векторов тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка окружности A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а точка A'_0 — при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок OA'_0 определяет ток $I_{х.х.}$, а угол $\angle A'_0OB_1 = \cos\phi_{х.х.}$. Точка A_3 окружности определяет положение конца вектора тока при коротком замыкании ($s = 1$), отрезок OA_3 — ток $I_{к.з.}$, а угол $\angle A_3OB_1 = \cos\phi_{к.з.}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока при $s = \infty$.

Промежуточные точки на дуге окружности A_0A_3 определяют положение концов векторов тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leq 1$). Ось абсцисс диаграммы OB является линией первичной мощности P_1 . Линией электромагнитной мощности $P_{эм}$ или электромагнитных моментов $M_{эм}$ является линия A_0A_2 . Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия A'_0A_3 . По круговой диаграмме для тока статора, которому соответствует точка A на окружности, можно рассчитать необходимые для построения рабочих характеристик данные:

ток статора, A , $I_1 = m_I |OA|$;

ток ротора, A , $I'_2 = m_I |A_0A|$;

первичную мощность, Вт, $P_1 = m_P |AN|$, где $AN \perp OB$;

электромагнитную мощность, Вт, $P_{эм} = m_P |AC|$, где $AC \perp A_0F$;

электромагнитный момент $M_{эм} = m_M |AC|$;

полезную мощность, Вт, $P_2 = m_P |AE|$;

КПД $|AE| / |AN|$;

коэффициент мощности $\cos\phi = \cos\angle AOB_1$;

скольжение двигателя $|DC| / |AC|$.

Для построения рабочих характеристик вначале находят положение на окружности точки A_n , которая соответствует номинальному режиму работы. Для этого, исходя из заданной номинальной мощности $P_{2ном}$, рассчитывают длину отрезка $|E'F_n| = P_{2ном}/m_P$ и откладывают на линии $F_1F' \perp A_0F$ от точки ее пересечения E' с линией полезной мощности A'_0A_3 . Через точку F_n проводят $F_nA_n \parallel A'_0A_3$. Точки пересечения F_nA_n с окружностью A_n и A'_n определяют положение концов вектора тока I_1 при мощности $P_{2ном}$. Точка A_n , ближайшая к A'_0 , соответствует номинальному режиму, точка A'_n — режиму неустойчивой работы двигателя (при $s > s_{кр}$).

Наметив на дуге A_0A_n несколько точек a_1, a_2, a_3, \dots , определяют соответствующие каждой из них данные $I_1, P_1, P_2, \cos\varphi, \eta, M, s$.

Из круговой диаграммы можно найти также приближенное значение кратности максимального момента M_{\max^*} . Оно будет несколько занижено, так же как и в аналитическом расчете без учета изменения параметров от насыщения полями рассеяния и от действия эффекта вытеснения тока.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме связан с определенными погрешностями при выполнении графических работ. Некоторое уточнение может дать сочетание графического метода и элементов аналитического. Например, I_1, I_2 и $\cos\varphi$ определяют по круговой диаграмме, а суммы потерь, P_2, P_1, s и η — расчетным путем, используя данные круговой диаграммы. В этом случае можно также учесть дополнительные потери, которые при построении круговой диаграммы не принимают во внимание [6].

Такая методика расчета иногда применяется на практике. Однако все более широкое распространение ЭВМ делает аналитический метод расчета рабочих характеристик более предпочтительным.