Обработка результатов эксперимента

В экспериментах на стенде показания индикаторов скорости вращения и момента соответствуют значениям этих величин в нагрузочной машине постоянного тока. Однако, если скорости вращения АД и МПТ всегда одинаковы, т.к. их валы жёстко соединены друг с другом, то вращающий момент АД отличается от момента нагрузки. Это связано с тем, что на вал установки действуют также моменты сухого и вязкого трения, явственно проявляющиеся в механической характеристике, построенной по экспериментальным данным.

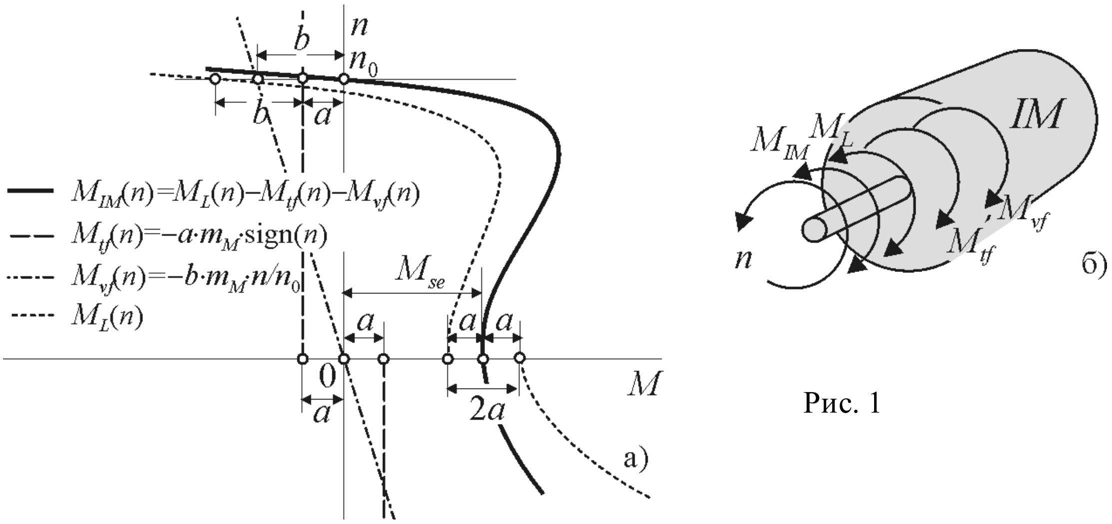

Рис. 1

Типичный вид такой характеристики $M_L = f(n)$ показан на рис. 1, *а*. Она имеет разрыв в режиме короткого замыкания и отрицательное значение момента при скорости идеального холостого хода $M_L(n_0) = -(a+b)\cdot m_M$. Это связано с тем, что вращающий момент на валу установки является суммой моментов асинхронного двигателя M_{IM}, нагрузочной машины M_L, момента сухого трения в опорах валов машин и в соединительной муфте M_{tf}, а также момента вязкого трения, связанного с трением о воздух и с внутренним «вязким трением» обеих машин.

Если моменты, направление действия которых совпадает с направлением вращения, принять за положительные, то моменты сухого и вязкого трения будут всегда отрицательными, а знаки моментов электрических машин будут определяться режимами их работы (рис. 1, *б*).

Момент сухого трения в первом приближении можно считать постоянным независимым от скорости вращения, а момент вязкого трения – линейно зависимым от скорости вращения (рис. 1, *а*). Тогда разрыв характеристики $M_L = f(n)$ в режиме короткого замыкания будет соответствовать двойному значению момента сухого трения $M_{tf} = -a\cdot m_M \cdot \mathrm{sign}(n)$, где $a = \left[M_L(0_+) - M_L(0_-)\right]/(2m_M)$ – величина отрезка, соответствующего половине разрыва; m_M – масштаб оси вращающего момента на графике.

Абсолютное значение M_L в режиме идеального холостого хода превышает M_{tf}, а т.к. момент двигателя в этом режиме равен нулю, то разность

$M_L(n_0) - M_{tf}(n_0) = -b \cdot m_M$ равна моменту вязкого трения $M_{vf}(n_0)$. Это позволяет вычислить для функции $M_{vf}(n) = k_v \cdot n$ коэффициент вязкого трения $k_v = \dfrac{M_L(n_0) - \left[M_L(0_+) - M_L(0_-)\right]/2}{n_0}$.

Таким образом, экспериментальную механическую характеристику асинхронного двигателя $M_{IM}(n)$ можно получить суммированием характеристик

$$M_{IM}(n) = M_L(n) - M_{tf}(n) - M_{vf}(n) =$$

$$= M_L(n) + \frac{M_L(0_+) - M_L(0_-)}{2} \cdot \mathrm{sign}(n) + \frac{\left[M_L(0_+) - M_L(0_-)\right]/2 - M_L(n_0)}{n_0} n$$

После этого значения координат $M_{IM}(n)$ можно использовать для определения параметров схемы замещения АД и получения расчётных характеристик двигателя.

Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по экспериментальным данным

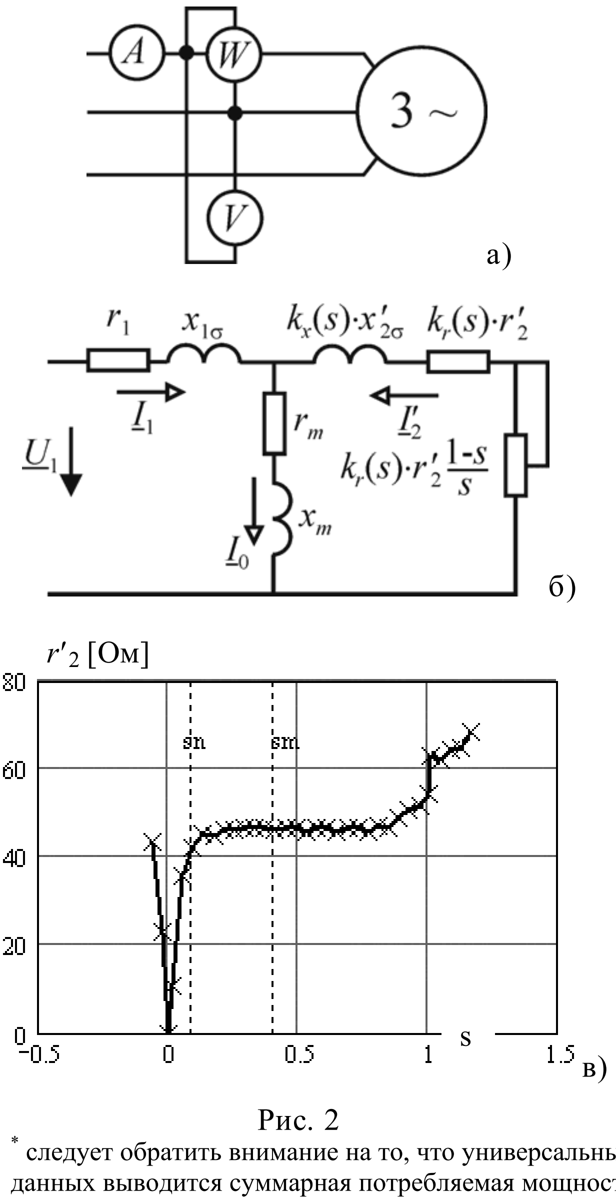

Рис. 2

Пользуясь экспериментальными характеристиками $M(n), I_1(n), P_1(n)$ можно определить параметры схемы замещения АД и сопоставить данные эксперимента с расчётными характеристиками.

Учитывая, что в режиме холостого хода ветвь ротора разомкнута, и схема замещения на рис. 2, *б* представляет собой последовательное соединение $r_1, x_{1\sigma}, r_m$ и x_m, суммарное активное $r_0 = r_1 + r_m$ и индуктивное $x_0 = x_{1\sigma} + x_m$ сопротивление можно определить следующим образом –

$$r_0 = \frac{P_1(n_0)}{\left[I_1(n_0)\right]^2};$$

$$x_0 = \frac{Q_1(n_0)}{\left[I_1(n_0)\right]^2} = \frac{U_1 I_1(n_0)\sin(\varphi_0)}{\left[I_1(n_0)\right]^2} = \frac{U_1 \sin(\varphi_0)}{I_1(n_0)} \quad (1)$$

где: $P_1(n_0)$ * – активная мощность, потребляемая двигателем с числом пар полюсов магнитного поля z_p при синхронной скорости вращения $n_0 = 60 f_1 / z_p$; $I_1(n_0)$ – фазный ток статора при синхронной ско-

* следует обратить внимание на то, что универсальный прибор на стенде измеряет фазную мощность, а в файл данных выводится суммарная потребляемая мощность, т.е. значение в три раза больше показаний прибора

рости; m_1 – число фаз; U_1 – действующее значение фазного напряжения; $\varphi_0 = \arccos\left[\dfrac{P_1(n_0)}{U_1 I_1(n_0)}\right]$.

Для определения индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора нужно воспользоваться данными режима короткого замыкания. Полагая, что $x_m \gg x_{1\sigma} \approx x_{2\sigma}$, получим:

$$x_{1\sigma} \approx x'_{2\sigma} = \frac{x_k}{2} = \frac{1}{2}\frac{U_1 \sin(\varphi_k)}{I_1(0)}, \qquad (2)$$

где $I_1(0)$ – ток статора при неподвижном роторе; $\varphi_k = \arccos\left[\dfrac{P_1(0)}{U_1 I_1(0)}\right]$

После этого можно найти индуктивное сопротивление ветви намагничивания

$$x_m = x_0 - x_{1\sigma} \qquad (3)$$

и коэффициент приведения Т-образной схемы к Г-образной

$$c_1 = 1 + x_{1\sigma} / x_m. \qquad (4)$$

На рис. 2, *в* показана зависимость значения сопротивления ротора от скольжения, рассчитанная через мощность скольжения –

$$\begin{gathered} P_s = M(s)\cdot\Omega_1 s = m_1\left[I''_2(s)\right]^2 c_1^2 r'_2 = m_1\left[I'_2(s)/c_1\right]^2 c_1^2 r'_2 \\ \Downarrow \\ r'_2(s) = \frac{M(s)\cdot 2\pi f_1 s}{m_1\left[I'_2(s)\right]^2 z_p} \approx \frac{M(s)\cdot 2\pi f_1 s}{m_1\left[I_1(s)\right]^2 z_p} \end{gathered} \qquad (5)$$

Из этого рисунка следует, что значение сопротивления ротора остаётся практически постоянным в большой области около точки опрокидывания. Вблизи пускового режима сопротивление растёт за счёт вытеснения тока, а при малых скольжениях его расчётное значение уменьшается в результате того, что мощность, рассеиваемая в роторе, становится соизмеримой с мощностью потерь в магнитопроводе. Поэтому следует принять, что

$$r'_2 = r'_2(s_m)^*. \qquad (6)$$

Теперь из выражения для критического скольжения можно найти активное сопротивление статора

$$s_m = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}} = \frac{n_1 - n_m}{n_1} \Rightarrow r_1 = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{s_m}\right)^2 - x_k^2}, \qquad (7)$$

а затем – $r_m = r_0 - r_1$

Последним параметром необходимым для получения расчётных характеристик является значение глубины паза h в коэффициентах вытеснения

---

* следует заметить, что величина r'_2 сильно зависит от значений момента и тока в точке опрокидывания, поэтому если расчётная механическая характеристика сильно отличается от экспериментальной, то следует уточнить эксперимент в области опрокидывания или проверить соседние точки, а затем и выбрать координаты, соответствующие линейной аппроксимацией между этими точками

$$k_r(s) = \xi \frac{\operatorname{sh} 2\xi + \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi};\ k_x(s) = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\xi - \sin 2\xi}{\operatorname{ch} 2\xi - \cos 2\xi};$$
$$\xi \approx h|s|^{\beta} \Rightarrow \xi \approx h\big|_{s=1};\ \beta = 0{,}5\ldots3{,}0 \tag{8}$$

где s – скольжение; β – показатель функции зависимости глубины проникновения тока при вытеснении, обычно принимаемый равным 0,5. Однако его значение можно увеличивать для получения формы механической характеристики, соответствующей справочным или экспериментальным данным.

При пуске АД

$$\xi \approx h\big|_{s=1};\ k_r(1) = k_r(h) = h\frac{\operatorname{sh} 2h + \sin 2h}{\operatorname{ch} 2h - \cos 2h};\ k_x(1) = k_x(h) = \frac{3}{2h} \cdot \frac{\operatorname{sh} 2h - \sin 2h}{\operatorname{ch} 2h - \cos 2h}$$

и глубину паза h можно определить численным решением уравнения

$$\frac{z_p m_1 U_1^2 r_2 \cdot k_r(h)}{\omega_1 \left\{ \left[r_1 + r_2' k_r(h) \right]^2 + \left[x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' k_x(h) \right]^2 \right\}} = M_{IM}(0) = M_{se} \tag{9}$$

где $M_{IM}(0)$ – экспериментальное значение пускового момента.

В среде *Mathcad* уравнение (9) можно решить с помощью функции определения корней h=root$[M_s(h) - M_{se}, h_0]$,

где $M_s(h) = \dfrac{z_p m_1 U_1^2 r_2 \cdot k_r(h)}{\omega_1 \left\{ \left[r_1 + r_2' k_r(h) \right]^2 + \left[x_{1\sigma} + x_{2\sigma}' k_x(h) \right]^2 \right\}}$ – зависимость пускового момента от глубины паза; M_{se}– экспериментальное значение пускового момента; h_0 – начальное значение для решения. Выбор начального значения h_0 имеет очень большое значение, т.к. функция $M_s(h)$ двузначная. Поэтому нужно предварительно построить график $M_s(h)$ и по нему ***приблизительно*** определить значение h, при котором $M_s(h) \approx M_{se}$ ***на участке, где*** $\partial M_s / \partial h > 0$.

В среде *Matlab* решение уравнения (9) можно получить с помощью функции h=fzero$[M_s(h) - M_{se}, h_0]$.

Более точное решение уравнения (9) может быть получено, если пусковой момент рассчитывать по выражению (16). Причём, в этом случае оно будет полностью совпадать со значением расчётной механической характеристики.

Расчёт характеристик асинхронного двигателя

Механическую, электромеханическую и рабочие характеристики АД можно рассчитать, пользуясь схемой замещения на рис. 2, *б*. Для этого нужно определить токи статора и ротора.

Входное сопротивление схемы замещения равно:

$$\underline{Z}_{in}(s) = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_m \underline{Z}_2(s)}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_2(s)} = r_1 + jx_{1\sigma} + \frac{(r_m + jx_m)\left[k_r(s) \cdot r_2'/s + jk_x(s) \cdot x_{2\sigma}' \right]}{r_m + k_r(s) \cdot r_2'/s + j\left[x_m + k_x(s) \cdot x_{2\sigma}' \right]} \tag{10}$$

Отсюда по закону Ома токи статора и ротора найдём в виде:

$$\underline{I}_1(s) = U_1 / \underline{Z}_{in}(s);^{*} \tag{11}$$

$$\underline{I'}_2(s) = \frac{\underline{I}_1(s) \cdot \underline{Z}_m}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_2(s)} = \frac{\underline{I}_1(s) \cdot \left(r_m + jx_m\right)}{r_m + k_r(s) \cdot r_2' / s + j\left[x_m + k_x(s) \cdot x_{2\sigma}'\right]} \tag{12}$$

Выражение (10) позволяет определить зависимость коэффициента мощности от скольжения

$$\cos[\varphi_1(s)] = \operatorname{arctg}\left[\frac{\operatorname{Im}\underline{Z}_{in}(s)}{\operatorname{Re}\underline{Z}_{in}(s)}\right]. \tag{13}$$

Модуль $\left|\underline{I}_1(s)\right|$ является уравнением электромеханической характеристики и позволяет получить зависимость потребляемой активной мощности от скольжения

$$P_1(s) = m_1 U_1 \left|\underline{I}_1(s)\right| \cos[\varphi_1(s)] \tag{14}$$

Пользуясь модулем $\left|\underline{I'}_2(s)\right|$ можно найти выражение для механической мощности и уравнение механической характеристики:

$$P_{mech}(s) = m_1 \left|\underline{I'}_2(s)\right|^2 k_r(s) \cdot r_2' \frac{1-s}{s};. \tag{15}$$

$$M_{IM}(s) = \frac{P_{mech}(s)}{\Omega} = \frac{z_p P_{mech}(s)}{2\pi f_1 (1-s)}. \tag{16}$$

Выражения (14) и (15) позволяют определить КПД машины в режимах двигателя и генератора как

$$\eta_m(s) = \frac{P_{mech}(s)}{P_1(s)}; \quad \eta_g(s) = \frac{P_1(s)}{P_{mech}(s)}. \tag{17}$$

[*] Фазное напряжение U_1 здесь вещественное число, т.е. его начальная фаза принята нулевой.