

## КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДА ОПЫТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

**Введение.** При экспериментальном определении параметров асинхронных двигателей чаще всего используются два опыта: холостого хода и короткого замыкания [1,2]. Кроме того, измеряется сопротивление статорной обмотки на постоянном токе. Однако полученных таким путем данных недостаточно для выделения отдельных составляющих, используемых при расчете режимов работы машин. Поэтому дополнительно принимается условие, что индуктивность намагничивающего контура намного превосходит индуктивность, обусловленную полем рассеяния статора. Последняя, в свою очередь, считается равной аналогичному параметру приведенных роторных контуров.

В асинхронных машинах нормального исполнения указанные допущения мало влияют на точность расчетных характеристик. Вместе с тем, имеется ряд генераторов и двигателей, для которых правомерность подобного решения сомнительна. Среди них, например, двигатели [3]:

- погружные с немагнитной гильзой в зазоре, предохраняющей обмотку статора от внешней среды;
- с массивным омедненным ротором;
- с увеличенным по эксплуатационным требованиям зазором и др.

**Постановка задачи.** Увеличение магнитного сопротивления на пути основного потока приводит к уменьшению индуктивности намагничивающего контура и возрастанию погрешности измеряемых параметров. Следует также отметить, что при анализе переходных процессов, как правило, используются уравнения, в которых не учитываются магнитные потери. В связи с чем желательно без изменения существующих алгоритмов численных решений иметь возможность уточнить энергетические соотношения исследуемого объекта.

Целью работы является корректировка методики обработки опытных данных при определении параметров асинхронных машин.

**Уравнения и схемы замещения асинхронной машины.** Режимы асинхронных машин могут быть представлены уравнениями в синхронных координатах и векторной форме:

$$\frac{d\dot{\Psi}_s}{dt} = \dot{u}_s - j\omega_s \dot{\Psi}_s - \dot{i}_s r_1; \quad \dot{\Psi}_s = x_{\sigma 1}(\dot{i}_s + \dot{i}_m) + x_a(\dot{i}_s + \dot{i}_m + \dot{i}_r). \quad (1)$$

$$\frac{d\dot{\Psi}_r}{dt} = -j(\omega_s - \omega) \dot{\Psi}_r - \dot{i}_r r_2; \quad \dot{\Psi}_r = x_{\sigma 2} \dot{i}_r + x_a(\dot{i}_s + \dot{i}_m + \dot{i}_r). \quad (2)$$

$$\frac{d\dot{\Psi}_{sm}}{dt} = -j\omega_s \dot{\Psi}_{sm} - \dot{i}_{sm} r_m; \quad \dot{\Psi}_{sm} = \dot{\Psi}_s. \quad (3)$$

Здесь все параметры и переменные измеряются в относительных единицах, как доли обычных для исследуемых машин базисных количеств. Выражение (3) учитывает влияние вихревых токов магнитопровода статора. Исходя из физической картины явлений, потокосцепление вихревых контуров ( $\dot{\Psi}_{sm}$ ) и статорной обмотки ( $\dot{\Psi}_s$ ) приняты равными [4-5].

При фиксированных параметрах, заданных частотах питающей сети ( $\omega_s$ ) и вращении вала ( $\omega$ ) после перехода в операторную область Карсона-Хевисайда и несущественных преобразований получим:

$$\dot{u}_s(p) = \dot{i}_s(p) \cdot z(p). \quad (4)$$

Выражение (4) соответствует схеме замещения рис.1.

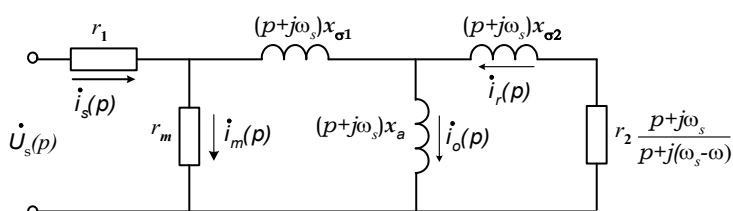


Рис.1. Операторная схема замещения асинхронной машины

В установившихся режимах формально  $p=0$  и схема рис.1 приобретает привычный вид. Ее особенность заключается в том, что активное сопротивление ( $r_m$ ), учитывающее магнитные потери, включено параллельно полной ЭДС статорной обмотки, включая составляющую, обусловленную потоками рассеяния [4-5]. Индуктивные сопротивления  $x_{\sigma 1}$ ,  $x_{\sigma 2}$ ,  $x_a$  умножением на  $\omega_s$  приводятся к текущему значению частоты сети, а активное сопротивление ротора  $r_2$  делится на скольжение  $s=(\omega_s-\omega)/\omega_s$ . Таким образом, для режимных расчетов необходимо уметь определять все параметры рис.1.

Дальнейшие шаги в этом направлении связаны с преобразованием схемы рис.1, аналогичны обычно используемому в теории установившихся режимов [6]. Произведем перенос намагничивающего контура ( $x_a$ ) рис.1 за операторное сопротивление  $(p+j\omega_s)x_{\sigma 1}$  (рис.2). При этом необходимо сохранить все энергетические соотношения. Последнее условие для идеального холостого хода выполняется, если  $x_{a\sigma} = x_a + x_{\sigma 1}$ . Во всех остальных режимах для заданных  $\dot{U}_s(p)$  и  $\dot{i}_s(p)$  сле-

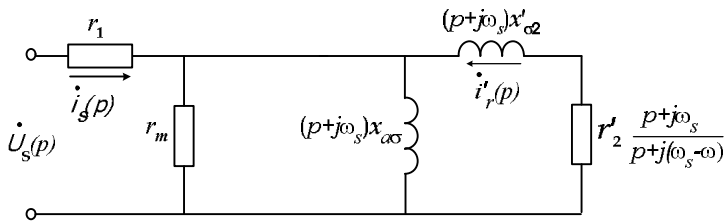


Рис.2. Преобразованная схема замещения

дует положить:

$$x'_{\sigma 2} = x_{\sigma 1} \left( 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_a} \right) + x_{\sigma 2} \left( 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_a} \right)^2; \quad r'_2 = r_2 \left( 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_a} \right)^2. \quad (5)$$

В отличие от рис.1 ток роторного контура ( $\dot{i}'_r$ ) становится равным:

$$\dot{i}'_r = \dot{i}_r \left( 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_a} \right)^{-2}. \quad (6)$$

Таким образом, в преобразованной схеме все параметры корректируются по модулю в зависимости от величины вещественной поправки  $\sigma_x = 1 + x_{\sigma 1}/x_a$ .

При желании контур  $(p+j\omega_s)x_a$  (рис.1) можно перенести за часть сопротивления  $(p+j\omega_s)x_{\sigma 1}$ , соответствующим образом изменив выражения (5-6) и рис.2. Если все сделано правильно, независимо от исследуемого режима будут иметь место идентичные результаты. Последнее положение доказывает, что при известной сумме индуктивностей рассеяния статорной и роторной обмоток их разделение на составляющие может быть выполнено произвольно.

Аналогично можно осуществить перенос сопротивления магнитных потерь ( $r_m$ ) на зажимы источника питания (рис.3). Тогда параметры на рис.3 будут иметь иные значения:

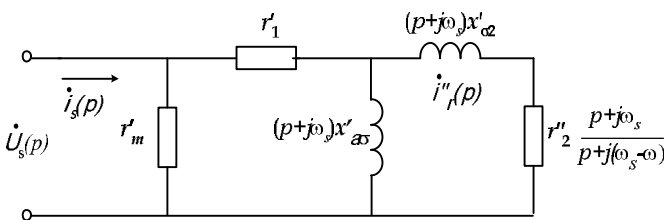


Рис.3. Вынесение магнитных потерь за пределы асинхронной машины

$$r'_1 = r_1 \sigma_r; \quad x'_{\sigma a} = x_{\sigma a} \sigma_r^2; \quad x''_{\sigma a} = x'_{\sigma a} \sigma_r^2; \\ r'_2 = r_2 \sigma_r^2; \quad r'_m = r'_m \sigma_r; \quad \sigma_r = 1 + r_1/r_m.$$

$$\text{При этом } \dot{i}''_r = \dot{i}'_r \sigma_r^{-2}.$$

Обычно величина сопротивления  $r_m$  намного превосходит  $r_1$ . Поэтому поправка  $\sigma_r$  весьма близка к единице. Только в установках малой мощности параметры рис.2-3 могут заметно отличаться. Последний прием, формально соответствующий вынесению магнит-

ных потерь за пределы асинхронной машины, позволяет при анализе режимов исключить выражение (2), используя, например, обычные уравнения Парка-Горева.

При расчете потребляемой мощности и тока достаточно дополнительно учесть процессы в активном сопротивлении  $r'_m$ , включенного на напряжение сети.

Отметим, что возможно и обратное преобразование схем рис.3 к рис.2-1.

**Опытное определение параметров.** Опыты холостого хода и короткого замыкания проводятся по обычной методике. Для первого из них рис.2 приобретает вид рис.4. В процессе опыта измеряются на фазу активная мощность  $P_0$ , напряжение  $U_0$  и ток  $I_0$ , сопротивление  $r_1$  постоянному току.

После проведения стандартной процедуры разделения потерь находим:

$$P_m = P_0 - I_0^2 r_1 - p_{\text{мех}},$$

где  $p_{\text{мех}}$  - механические потери.

Далее вычисляем сопротивление параллельно включенных элементов  $r_m$  и  $jx_{a\sigma}$ :

$$r_0 = \frac{P_m}{I_0^2}; \quad z_0 = \frac{U_0}{I_0}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

Отсюда находим

$$x_{a\sigma} = \frac{x_0^2 + r_0^2}{x_0}; \quad r_m = \frac{x_0^2 + r_0^2}{r_0}.$$

В опыте короткого замыкания ( $s=1$ ) схема рис.2 соответствует рис.5.

После измерений  $P_k, U_k, I_k$  вычисляются:

$$R_k = \frac{P_k}{I_k^2}; \quad Z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; \quad r_k = R_k - r_1. \text{ Полученные параметры представляют сопротивления}$$

параллельно включенных контуров, из которых по опыту холостого хода известны  $r_m$  и  $x_{a\sigma}$ . Тогда для определения  $r'_2$  и  $x'_{\sigma 2}$  достаточно воспользоваться формулами:

$$r'_2 = \frac{y_{a\sigma}}{y_{\sigma}^2}; \quad x'_{\sigma 2} = \frac{y_{x\sigma}}{y_{\sigma}^2};$$

где  $y_{a\sigma} = \frac{R_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}^2} - \frac{1}{r_m}$ ;  $y_{x\sigma} = \frac{x_{\hat{e}}}{Z_{\hat{e}}^2} - \frac{1}{x_{a\sigma}}$ ;  $y_{\sigma}^2 = y_{a\sigma}^2 + y_{x\sigma}^2$ .

В принципе для решения режимных задач можно непосредственно использовать полученные данные. Однако при этом потребуются корректировка обычно применяемых уравнений и алгоритмов. Поэтому целесообразно осуществить обратный перенос контура намагничивания  $jx_{a\sigma}$  за часть сопротивления  $jx'_{\sigma 2}$  с целью разделения  $x'_{\sigma 2}$  на составляющие  $x_{\sigma 1}$  и  $x_{\sigma 2}$  (рис.1), причем безразлично в какой пропорции. Необходимо лишь правильно определить вещественные поправки  $\sigma_x$  и  $\sigma_r$ . Допустим, что  $x_{\sigma 1} = x'_{\sigma 2}/k$ , (например  $k=2$ ). Тогда:

$$\sigma_x = 1 + \frac{x'_{\sigma 2}}{kx_{a\sigma}}; \quad x_{\sigma 1} = \frac{x'_{\sigma 2}}{k\sigma_x}; \quad x_{\sigma 2} = \frac{k-1}{k} \frac{x'_{\sigma 2}}{k\sigma_x^2}; \quad x_{\sigma 2} = \frac{x_{a\sigma}}{\sigma_x}; \quad r_2 = \frac{r'_2}{\sigma_x^2}.$$

Некоторые результаты расчета параметров динамических режимов при различных величинах  $X_a$ , варьируемых за счет изменения воздушного зазора, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Влияние метода определения на величины параметров асинхронного двигателя

$r_1$	$x_{a\sigma}$	$x'_{a\sigma}$	$\sigma_x$	$r'_2$	$x_a$	$r_2$	$x_{\sigma 2}$	$x_{\sigma 1}$	$\Delta m_c$
0,06	3,5	0,313	1,045	0,0769	3,35	0,0705	0,143	0,150	5,6
0,06	3,0	0,318	1,053	0,0793	2,85	0,0715	0,143	0,151	7,8
0,06	2,5	0,325	1,065	0,0829	2,35	0,0731	0,143	0,152	9,5
0,06	2,0	0,335	1,084	0,0886	1,84	0,0754	0,143	0,155	11,9
0,06	1,5	0,352	1,117	0,099	1,34	0,0793	0,141	0,158	15,7
0,06	1,2	0,372	1,155	0,112	1,04	0,0839	0,139	0,161	19,8

Здесь в качестве базового принят погружной асинхронный двигатель типа REDA VT-x.456 ( $P_n=30\text{кВт}$ ,  $U_n=958\text{В}$ ,  $n_n=2860\text{об/мин}$ ). Опытные ненасыщенные значения его параметров, определенные по обычной методике, равны:

$$r_1=0,06\text{о.е.}; \quad r_2=0,065\text{о.е.}; \quad x_{\sigma 1}=x_{\sigma 2}=0,145\text{о.е.}; \quad x_a=x_{a\sigma}=2,75\text{о.е.}$$

Пересчет тех же параметров по предлагаемой схеме при  $k=2$  с уменьшением  $x_a$  приводит к заметным изменениям, особенно активного сопротивления ротора. Этот фактор существенно влияет на величину электромагнитного момента. В последнюю графу табл. 1. занесена погрешность  $\Delta m_c = ((m'_c - m_c)/m'_c) \cdot 100\%$ , найденная при скольжении  $s=0,05$  и номинальном напряжении питания ( $U_s=1$ ). Здесь  $m'_c$  и  $m_c$  – соответственно моменты, рассчитанные по обычным и откорректированным параметрам.

Учет насыщения возможен известными методами. В двигателях с вытеснением тока во вторичной среде рассмотренным способом следует обрабатывать частотные характеристики с целью дальнейшего построения многоконтурной модели.

#### Выводы.

1. При определении параметров математической модели асинхронных короткозамкнутых машин из опытов холостого хода и короткого замыкания необходимо учитывать влияние намагничивающего контура на сопротивления вторичной цепи. В двигателях с увеличенным воздушным зазором погрешность обычно принимаемых допущений при расчете электромагнитного момента иногда достигает десятка процентов.
2. Разделение индуктивного сопротивления короткого замыкания на составляющие может быть достаточно произвольно, однако при этом требуется корректировка всех параметров уравнений динамики.
3. Учет магнитных потерь возможен с помощью вынесенного на зажимы сети активного сопротивления. В этом случае существенно упрощается структура модели, более просто решается вопрос численного анализа переходных процессов асинхронных машин в энергосистемах ограниченной мощности.

#### Литература.

1. Жерве Г.К. Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Поклонов С.В. Асинхронные двигатели герметичных электронасосов. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Guemts J.A., Yoyo J.I. A new equivalent circuit for three-phase induction motors. Pros.Int.conf. on electrical machines, ICEM-2000, Helsinki 2000, V.1, p.402-406.
5. Popescu M., Navrapescu V. Modelling in stationary frame reference of single and two-phase induction machines including the effect of iron loss and magnetising flux saturation. Pros.Int.conf. on electrical machines, ICEM-2000, Helsinki, 2000, V.1, p.407-411.
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия 1978, 832 с.