

СИНТЕЗ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Харченко П.А.
Донецкий национальный технический университет
svf@elf.dgtu.donetsk.ua, tsnars@skif.net

The article includes the new synthesis parameters of equivalent scheme of squirrel-cage rotor induction motor from experimental data. The mathematical description of new method of induction motor parameters synthesis is describing in this article. Also sample synthesis parameters of equivalent scheme of 7 kW power and 660 V stator voltage induction motor with using new method are shown.

Постановка задачи. Асинхронные двигатели (АД) получили широкое применение в современных электроустановках и составляют почти 95% от всего количества приводных двигателей, используемых в промышленности. В настоящее время является актуальной проблема синтеза параметров схем замещения асинхронных машин с короткозамкнутым ротором по экспериментальным данным, поскольку каталожные данные, предоставляемые заводами-изготовителями могут отличаться от действительных на 50% и более. Большие погрешности имеют место для следующих величин: пускового момента, максимального момента, кратности пускового тока, номинального скольжения, что особенно характерно для АД мощностью 100 кВт и выше, в которых присутствует эффект вытеснения тока в роторе. Поэтому наибольший интерес представляют методы синтеза параметров схем замещения АД на основе экспериментальных и уточнённых каталожных данных.

Анализ последних исследований. Вопросам синтеза АД посвящены работы [1,2,3], в которых рассматриваются в основном двигатели общепромышленного исполнения с незначительным эффектом вытеснения тока в роторе. Кроме того, расчетные значения токов и моментов по синтезированной указанными методами схеме замещения могут отличаться от исходных на 30-40% и более.

Существующие в настоящее время методы экспериментального определения параметров широкодиапазонных электродвигателей рекомендуемые ГОСТ [4], требуют сложной дорогостоящей аппаратуры и обладают недостаточной точностью.

Задача исследований. Данная работа посвящена синтезу параметров схем замещения АД по экспериментальным данным и в ней поставлена задача найти такие параметры схем замещения, рассчитанные по которым токи и моменты, с достаточной точностью совпадали бы с исходными.

Изложение основного материала. Как показано в [5,6] наиболее точно описывает стационарные и переходные процессы широкодиапазонного АД схема замещения, в которой ротор с учётом явления вытеснения тока (скин-эффекта) представлен многозвенной схемой (рис.1). При этом в большинстве случаев, согласно [5], можно ограничиться двумя роторными контурами по каждой из осей системы координат.

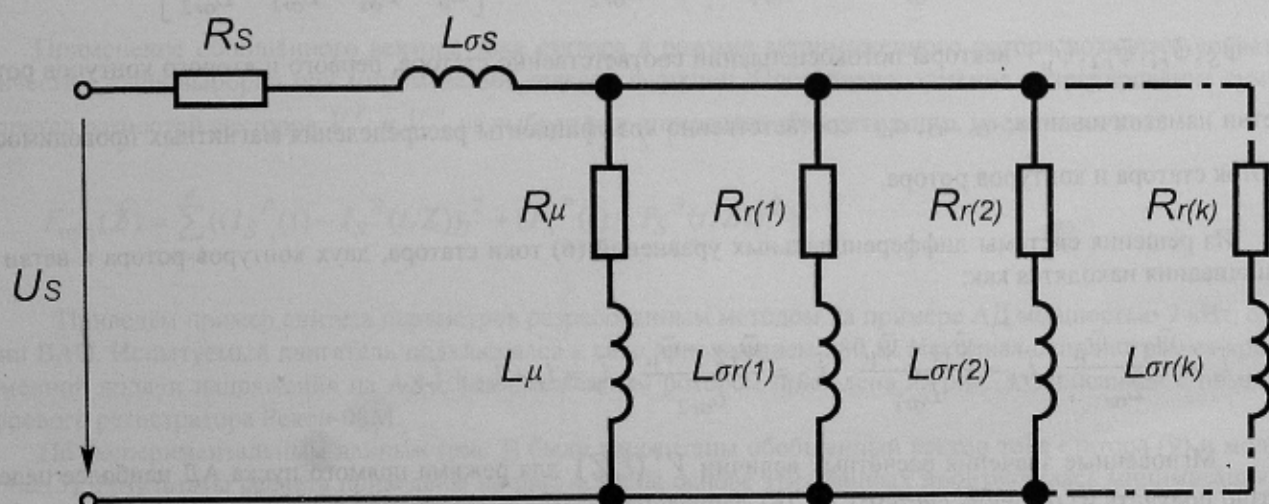


Рисунок 1 – Схема замещения асинхронного двигателя с многозвенным ротором

Принимаем такую схему за основу. Вектор искомых параметров такой схемы замещения, состоящей из активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния статора ($R_s, L_{\sigma s}$), ветви намагничивания (R_{μ}, L_{μ}), ротора ($R_{r1}, L_{\sigma r1}, R_{r2}, L_{\sigma r2}$) имеет следующий вид:

$$Z = [R_s, L_{\sigma s}, R_{\mu}, L_{\mu}, R_{r1}, L_{\sigma r1}, R_{r2}, L_{\sigma r2}]^{tr} \quad (1)$$

Основная идея предлагаемого метода состоит в определении вектора Z из условия минимизации квадратов отклонений расчетных мгновенных значений фазных токов статора, частоты вращения и потребляемой электромагнитной мощности от экспериментальных, полученных из обычного эксплуатационного режима прямого пуска АД:

$$V^{\ominus}(t) = [i_a(t), i_b(t), i_c(t), P(t), \omega(t)]^T, \quad (2)$$

$$V^P(t, Z) = [i_a(t, Z), i_b(t, Z), i_c(t, Z), P(t, Z), \omega(t, Z)]^T, \quad (3)$$

$$F_{\min}(t, Z) = \int_0^t (V^P(t, Z) - V^{\ominus}(t))^2 dt, \quad (4)$$

$$P_S(t) = u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) + u_c(t) \cdot i_c(t) \quad (5)$$

$$R_s > 0, L_{\sigma s} > 0, R_{r1} > 0, L_{\sigma r1} > 0, R_{r2} > 0, L_{\sigma r2} > 0.$$

В (2)-(5) V^{\ominus}, V^P – соответственно векторы экспериментальных и расчётных параметров режимов работы, i_a, i_b, i_c – мгновенные значения токов статора, P – мгновенная электромагнитная мощность, ω – мгновенная угловая частота вращения ротора, записанные в относительных единицах.

Следует отметить, что получение статических режимных параметров в широком диапазоне скольжений затруднительно и, как правило, ограничивается только относительно небольшим диапазоном рабочих скольжений. Именно поэтому наиболее целесообразным является использование эксплуатационных режимов пуска АД. В этом случае расчетные значения режимных параметров определяются из системы дифференциальных уравнений (ДУ).

$$\begin{aligned} p\bar{\Psi}_s &= \bar{U}_s - R_s \bar{i}_s - R_{\mu} \bar{i}_{\mu} - j\omega_{\kappa} \bar{\Psi}_s, \\ p\bar{\Psi}_{r1} &= -R_{r1} \bar{i}_{r1} - R_{\mu} \bar{i}_{\mu} - j(\omega_{\kappa} - \omega) \bar{\Psi}_{r1}, \\ p\bar{\Psi}_{r2} &= -R_{r2} \bar{i}_{r2} - R_{\mu} \bar{i}_{\mu} - j(\omega_{\kappa} - \omega) \bar{\Psi}_{r2}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{\Psi}_{\mu} = a_s \bar{\Psi}_s + a_{r1} \bar{\Psi}_{r1} + a_{r2} \bar{\Psi}_{r2},$$

$$p\omega = J^{-1} \cdot (M - M_c(\omega, K_3)),$$

$$M = \frac{3}{2} (\bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s), \quad a_s = \frac{L_{sr}}{L_{\sigma s}}, \quad a_{r1} = \frac{L_{sr}}{L_{\sigma r1}}, \quad a_{r2} = \frac{L_{sr}}{L_{\sigma r2}}, \quad L_{sr} = \left[\frac{1}{L_{\mu}} + \frac{1}{L_{\sigma s}} + \frac{1}{L_{\sigma r1}} + \frac{1}{L_{\sigma r2}} \right]^{-1},$$

где $\bar{\Psi}_s, \bar{\Psi}_{r1}, \bar{\Psi}_{r2}, \bar{\Psi}_{\mu}$ – векторы потокоцеплений соответственно статора, первого и второго контуров ротора и ветви намагничивания; a_s, a_{r1}, a_{r2} – соответственно коэффициенты распределения магнитных проводимостей обмоток статора и контуров ротора.

Из решения системы дифференциальных уравнений (6) токи статора, двух контуров ротора и ветви намагничивания находятся как:

$$\bar{i}_s = \frac{\bar{\Psi}_s - \bar{\Psi}_{\mu}}{L_{\sigma s}}, \quad \bar{i}_{r1} = \frac{\bar{\Psi}_{r1} - \bar{\Psi}_{\mu}}{L_{\sigma r1}}, \quad \bar{i}_{r2} = \frac{\bar{\Psi}_{r2} - \bar{\Psi}_{\mu}}{L_{\sigma r2}}, \quad \bar{i}_{\mu} = \bar{i}_s + \bar{i}_{r1} + \bar{i}_{r2}, \quad (7)$$

Мгновенные значения расчётных величин $V^P(t, Z)$ для режима прямого пуска АД наиболее целесообразно получать из решения системы ДУ (6), записанной в неподвижной относительно статора ($\omega_{\kappa} = 0$) системе координат α, β , расчётные значения в которой наиболее близко совпадают с соответствующими величинами в осях a, b, c . Последние находятся по формулам перехода (8).

$$i_a = i_{\alpha}, \quad i_b = -\frac{1}{2} \cdot (i_{\alpha} - \sqrt{3} \cdot i_{\beta}), \quad i_c = -\frac{1}{2} \cdot (i_{\alpha} + \sqrt{3} \cdot i_{\beta}). \quad (8)$$

Определение вектора параметров Z производится следующим образом: 1) рассчитывается вектор начальных приближений $Z^{(0)}$; 2) По системе ДУ (6) рассчитывается режим пуска АД при использовании экспериментальных напряжений статора и вектора $Z^{(0)}$; 3) производится вычисление функции $F(t, Z)$ по (4) с использованием экспериментальных и расчетных значений параметров режима; 4) Одним из численных методов производится минимизация целевой функции $F(t, Z)$ по (4) и находятся новые значения вектора параметров; 5) Производится циклическое повторение расчёта до момента достижения удовлетворительной точности.

Для расчёта начальных приближений вектора $Z^{(0)}$ рекомендуется использовать инженерный метод, изложенный в [5,6], позволяющий определить параметры схемы замещения по каталожным данным или уточнённым из эксперимента для скольжений $S = 1, 0$ и $S_{ном}$.

$$Z^{(0)} = [R_S^{(0)}, L_{\sigma S}^{(0)}, R_{\mu}^{(0)}, L_{\mu}^{(0)}, R_{r1}^{(0)}, L_{\sigma r1}^{(0)}, R_{r2}^{(0)}, L_{\sigma r2}^{(0)}]^{tr}.$$

Отметим, что омическое сопротивление обмотки статора R_S измеряется на отключённом от сети АД, а параметры $L_{\sigma S}, R_{\mu}, L_{\mu}$ находим из режима нагрузки и холостого хода асинхронной машины общеизвестными методами.

Таким образом, минимизация целевой функции сводится к решению переопределённой системы нелинейных уравнений относительно искомых параметров ротора.

При практической реализации данного метода требуется осциллографирование в режиме пуска АД мгновенных значений фазных токов и напряжений, потребляемой мощности, частоты вращения. Регистрация указанных параметров осуществляется с помощью цифровых осциллографов. Однако наибольшие затруднения возникают в связи с необходимостью регистрации угла поворота ротора и определения характера зависимости момента сопротивления механизма $M_c(\omega, t)$, а также махового момента агрегата.

В связи с этим в данной работе рассмотрена возможность определения параметров схемы замещения из режима кратковременной подачи пониженного или полного трёхфазного напряжения сети на статор при заторможенном роторе. В этом случае отпадает необходимость регистрировать угол поворота ротора, что существенно упрощает эксперимент.

Параметры АД при этом представляется возможным определить по входной переходной функции АД, которая содержит в себе информацию о частотных характеристиках сопротивлений ротора и статора. Время регистрации переходного процесса определяется длительностью затухания апериодических составляющих в токах статора и ротора, а также в электромагнитном моменте.

Выполненные численные исследования показали, что с целью сокращения затрат машинного времени и повышения численной устойчивости решаемых систем нелинейных уравнений целесообразно использовать вместо фазных токов статора результирующий обобщённый вектор тока статора (9).

$$I_S = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)}, \quad (9)$$

Применение обобщённого вектора тока статора в режиме заторможенного ротора позволяет сократить количество точек выборки при минимизации целевой функции. Последнюю, заменив интегрирование суммой квадратов разностей векторов V^P и V^{\exists} на выбранных интервалах дискретизации, представим как:

$$F_{\min}(Z) = \sum_{i=1}^n ((I_S^P(t) - I_S^{\exists}(t, Z))_i^2 + (P_S^P(t) - P_S^{\exists}(t, Z))_i^2) \quad (10)$$

Приведём пример синтеза параметров разработанным методом на примере АД мощностью 7 кВт, 660 В серии ВАО. Испытуемый двигатель подключался к сети напряжением 380 В. Исходная осциллограмма кратковременной подачи напряжения на АД с заторможенным ротором приведена на рис. 3. записанная с помощью цифрового регистратора Рекон-08М.

По экспериментальным данным (рис.3) были рассчитаны обобщённый вектор тока статора (9) и мощности по (5). Результаты расчёта приведены на рис. 4,5 и на основе этих данных производилась минимизация целевой функции (4). В качестве расчетных данных использовались, полученные из решения уравнений (6) эти же величины. При этом в процессе минимизации целевой функции производились последовательные уточнения синтезируемых параметров.

При минимизации был принят интервал длительностью около одной секунды, то есть время в течении которого происходит затухание переходного процесса при заторможенном роторе и при подаче на статор трёхфазного номинального напряжения.

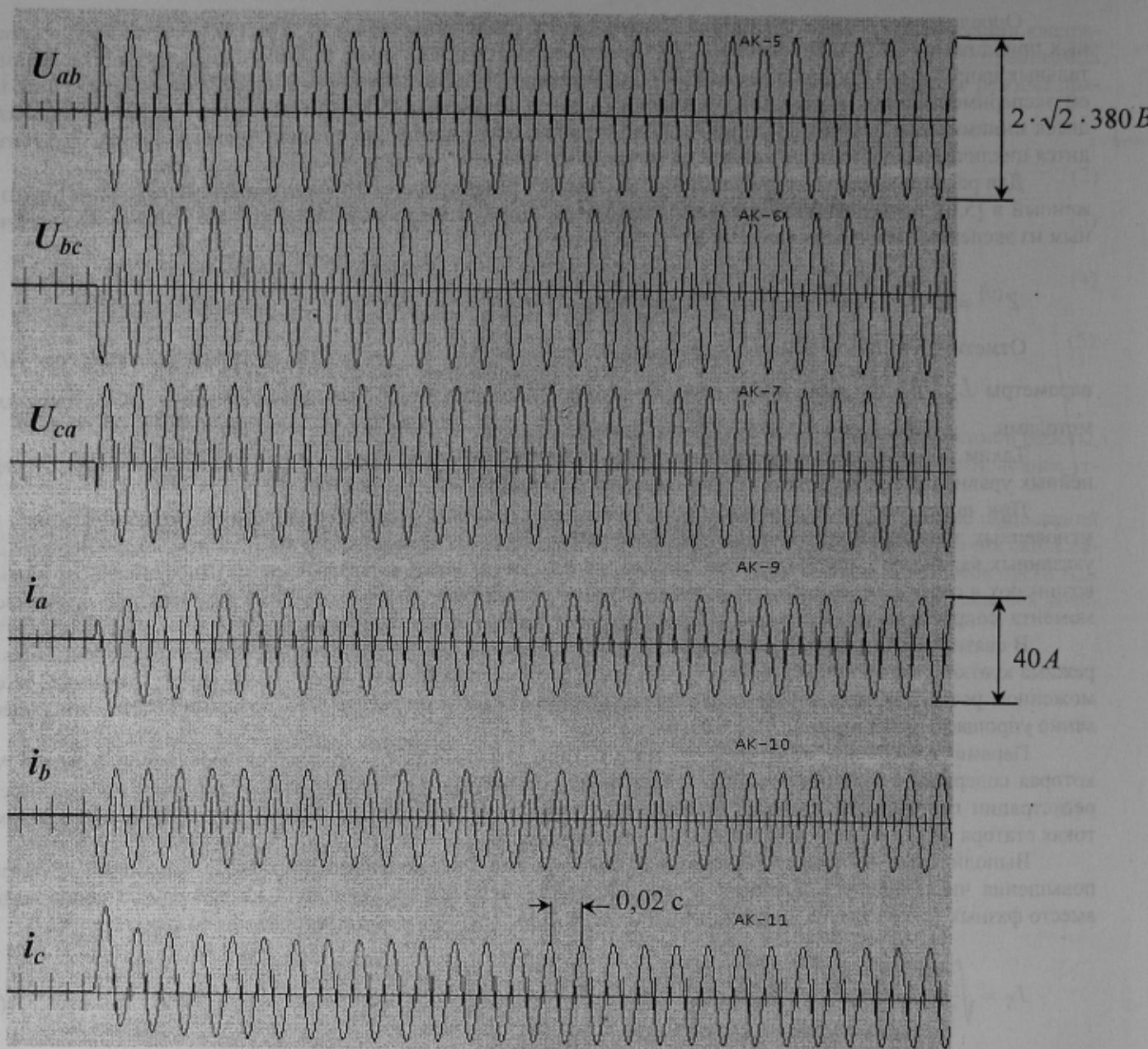


Рисунок 3 – Экспериментальные осциллограммы линейных напряжений и фазных токов статора АД 20 кВт при заторможенном роторе, записанных с помощью цифрового регистратора РЕКОН-08М

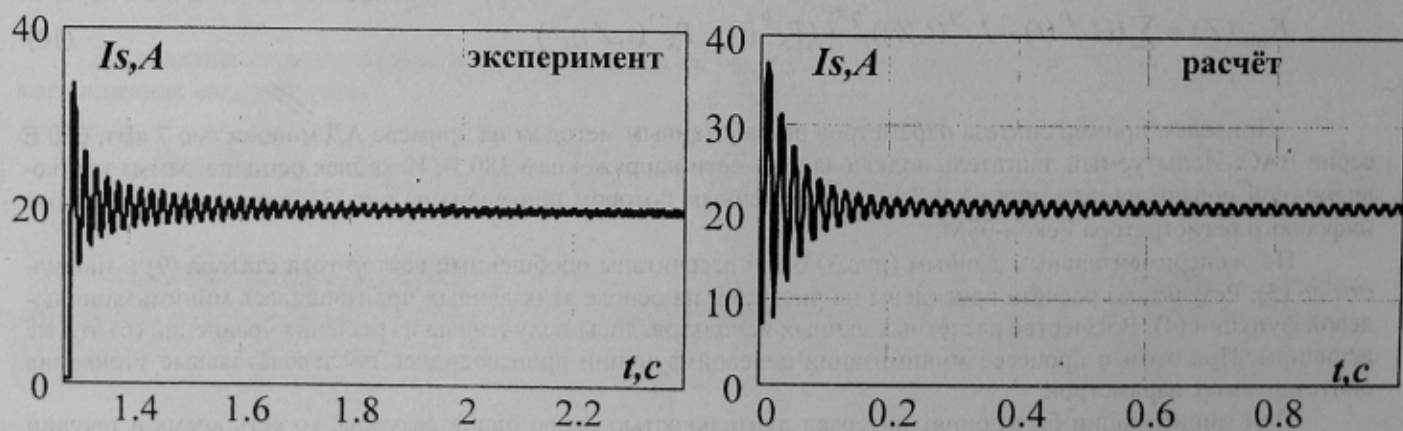


Рисунок 4 – Процесс изменения во времени обобщенного вектора тока статора АД, рассчитанного по экспериментальным (слева) данным и на модели (справа) по уравнениям (6)

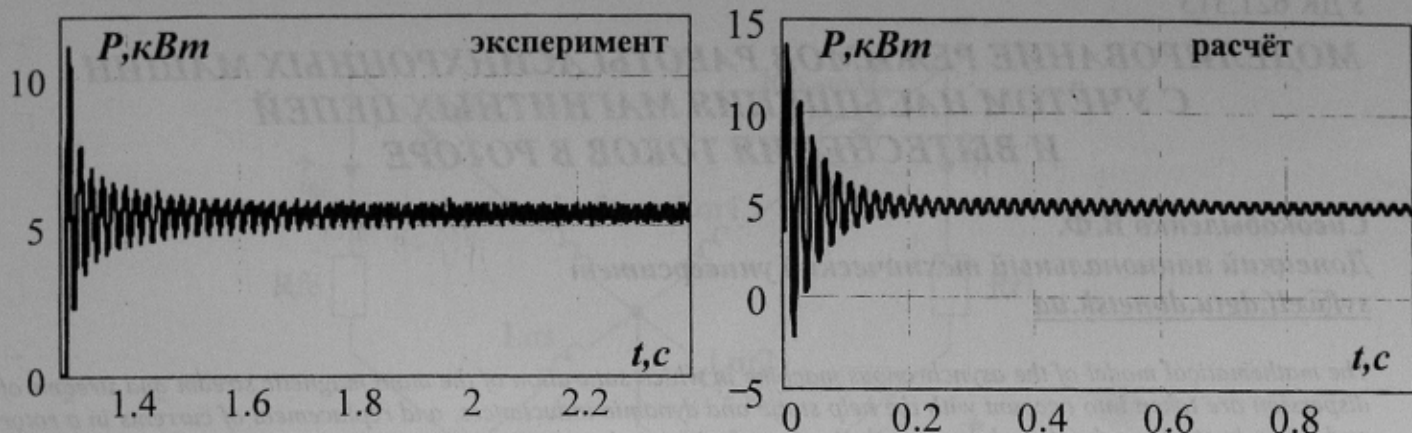


Рисунок 5 – Процесс изменения во времени потребляемой АД, электромагнитной мощности рассчитанной по экспериментальным (слева) данным и на модели (справа) по уравнениям (6)

Отметим, что для решения изложенной задачи требуется персональный компьютер на базе процессора с тактовой частотой порядка 1 ГГц и оперативной памятью в минимальном размере 256 Мб.

На основе экспериментальных данных для двигателя серии ВАО мощностью 7 кВт напряжением 660 В, рассмотренным методом были получены следующие параметры вектора Z (в относительных единицах) схемы замещения с двумя эквивалентными контурами на роторе:

$$R_S = 0,0052; L_{\sigma S} = 0,1;$$

$$R_{\mu} = 0,126; L_{\mu} = 1,822;$$

$$R_{r1} = 0,01; L_{\sigma r1} = 0,107;$$

$$R_{r2} = 0,435; L_{\sigma r2} = 0,0053.$$

Результаты сравнения расчётных и экспериментальных данных (рис. 4,5) подтверждают достоверность разработанного метода.

Выводы:

1. Предложен метод синтеза параметров асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором по экспериментальным данным, который основан на минимизации среднеквадратичного отклонения экспериментальных и расчетных мгновенных значений фазных токов статора, частоты вращения и потребляемой электромагнитной мощности.
2. Для синтеза параметров АД используются осциллограммы режима прямого пуска при подаче на статор пониженного или полного напряжения. Показана возможность использования режима подачи напряжения на АД при заторможенном роторе;
3. Предложенный метод имеет преимущества перед известными и рекомендованными ГОСТ [4], так как не требует использования громоздкой аппаратуры и обладает большей точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин // Электричество. – 1999. - №11. - С. 29-31.
2. Мощинский Ю.А., Осин И.Л. Определение параметров трёхфазного асинхронного двигателя из опыта несимметричного питания // Электричество. – 1993. - №1. - С. 39-43.
3. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кириякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. – 1998. - №4. - С. 38-42.
4. ГОСТ 7217-87. Межгосударственный стандарт. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. - 2003. - 38 с.
5. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций. Уч. пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2002. - 136 с.
6. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А. Расчет параметров схем замещения и пусковых характеристик глубокопазных асинхронных машин // Электричество. – 1979. - №10. - С. 35 – 39.

Рекомендовано проф., д.т.н. Заболотным И.П.