

А.В. КЛЕМЕНТЬЕВ, инженер

УТОЧНЁННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЁТА ОСНОВНЫХ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, МАКСИМАЛЬНОГО МОМЕНТА И КРИТИЧЕСКОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРИЁМО-СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Запропонована методика розрахунку основних пускових характеристик, максимального моменту і критичного ковзання згідно результатів приймально-здавальних випробувань асинхронних двигунів

Предложена методика расчёта основных пусковых характеристик, максимального момента и критического скольжения по результатам приёмо-сдаточных испытаний асинхронных двигателей.

Введение. В настоящее время отсутствуют нормативные документы, определяющие алгоритмы, по которым рассчитывались бы пределы изменения (нормы) величин, измеряемых в процессе приёмо-сдаточных испытаний асинхронных двигателей (токов I_0 и I_k , потерь P_0 и P_k опытов холостого хода и короткого замыкания). Имеются лишь немногочисленные публикации по данному вопросу, например [1-4].

В практике электромашиностроительных заводов часто используются упрощённые методы расчёта норм, позволяющие вычислять их по каждой из измеряемых величин в отдельности. С целью уменьшения риска выпустить бракованные двигатели нормы вычисляются с некоторым "запасом". В некоторых случаях выхода значений измеряемых величин за установленные границы возникает необходимость проведения испытаний по программе периодических, что значительно увеличивает трудоёмкость контроля качества выпускаемой продукции.

В расчётах моментов, пускового тока и критического скольжения при обработке результатов испытаний необходим правильный подход, учитывающий явление насыщения путей потоков рассеяния, которое приводит к уменьшению индуктивного сопротивления короткого замыкания. Эта величина непрерывно уменьшается с ростом тока. В результате зависимость тока от напряжения при коротком замыкании представляет собой кривую, вогнутую во всех точках. В силу этого определение пускового тока по касательной (ГОСТ 7217-87) может занижить его величину. Погрешность может быть существенной, если в машине имеются закрытые или полузакрытые пазы на статоре или роторе.

Кроме того, при расчёте максимального момента необходимо учесть

эффект вытеснения тока в стержнях короткозамкнутой обмотки.

Целью данной статьи является разработка уточнённой методики расчёта основных пусковых характеристик, критического скольжения и максимального момента по результатам приёмо-сдаточных испытаний, основанная на использовании классических соотношений, корректирующих коэффициентов, индивидуальных для каждого типоразмера двигателя, и на применении эмпирически установленных соотношений, учитывающих насыщение и вытеснение.

Вывод основных расчётных соотношений и расчёт корректирующих коэффициентов. Анализ испытаний двигателей различных серий мощностью до 100 кВт показал, что в пределах от 1-1,5 номинального тока до пускового индуктивное сопротивление короткого замыкания x_{kl} зависит от тока I_k в достаточно точном соответствии с соотношением, предложенным Э.Д. Кравчиком [5]:

$$x_{kl} = a + \frac{b}{\sqrt[3]{I_k}}, \quad (1)$$

где a и b – постоянные для данной машины коэффициенты.

Эти коэффициенты оцениваются по результатам периодических испытаний с использованием метода наименьших квадратов.

Коэффициент C_{I_n} , корректирующий кратность пускового тока, вычисляется по результатам периодических испытаний следующим образом. Сначала рассчитывается пусковой ток I_{np} по итерационной схеме:

$$\begin{cases} x_{kl}^{(m+1)} = a + \frac{b}{\sqrt[3]{I_n^{(m)}}}; \\ I_n^{(m+1)m} = \frac{U_n}{\sqrt{r_k^2 + [x_{kl}^{(m+1)}]^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

где r_k – активное сопротивление короткого замыкания, U_n – номинальное фазное напряжение.

Коэффициент C_{I_n} вычисляется делением величины тока по периодическим испытаниям I_{nu} на величину тока I_{np} .

Расчёт пускового тока двигателя по результатам приёмо-сдаточных испытаний проводится по итерационной схеме (2) с умножением результата на корректирующий коэффициент C_{I_n} .

Поскольку пусковой момент пропорционален потерям в обмотке ротора, то его можно вычислить по соотношению:

$$M_{np} = M_{nu} \cdot \frac{(r_{kp} - r_{lp}) \cdot I_{np}^2}{(r_{ku} - r_{lu}) \cdot I_{nu}^2}$$

где нижний индекс «*u*» соответствует данным периодических испытаний; индекс «*p*» соответствует данным расчёта по результатам приёмо-сдаточных испытаний.

Для расчёта максимального момента по результатам приёмо-сдаточных испытаний с учётом насыщения и вытеснения тока в стержнях обмотки ротора воспользуемся упрощённым выражением для электромагнитного момента в общепринятых обозначениях:

$$M \approx \frac{m_1 \cdot U_n^2 \cdot p \cdot \frac{r'_2}{S}}{2\pi \cdot f \cdot \left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{S} \right)^2 + x_{kl}^2}, \quad (3)$$

где коэффициент $c_1 \approx (1,03 \div 1,07) \approx 1,05$.

Выражение (3) может быть использовано в общем случае, т.е. также тогда, когда параметры не постоянны и зависят от токов и скольжения. В этом случае при каждом значении скольжения в выражение (3) нужно подставлять соответствующие значения параметров [6].

Для расчёта максимального момента по результатам приёмо-сдаточных испытаний необходимо рассчитать критическое скольжение, что приводит к необходимости предварительно рассчитать два коэффициента (q и C_{skp}).

Анализ показывает, что ток фазы обмотки статора в процессе пуска $I'(s)$ в функции скольжения может быть приближённо определён через следующее соотношение:

$$I'(s) \approx I_n \cdot s^q = k_I \cdot I_{1n} \cdot s^q, \quad (4)$$

где I_n – пусковой ток; k_I – кратность пускового тока, I_{1n} – номинальный ток, q – степень, определяемая индивидуально для каждого типоразмера двигателя.

По двум известным из периодических испытаний значений тока $I'(s)$: ($I_n, s=1$) и (I_{1n}, s_n) величина q может быть определена из следующего соотношения:

$$q = -\frac{\ln k_I}{\ln s_n}, \quad (5)$$

где s_n – номинальное скольжение.

Из соотношений (1) и (4) получаем выражение индуктивного сопротивления двигателя в функции скольжения при пуске:

$$x_{kp}(s) = a + \frac{b}{\sqrt[3]{I_n \cdot s_{kp}^q}} \quad (6)$$

Учёт вытеснения тока в стержнях ротора при критическом скольжении s_{kp} проводится следующим образом. Приведённое активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме $r'_2(s_n)$ (т.е. без учёта вытеснения тока) определяется через сопротивление r'_{2k} опыта короткого замыкания на пониженном напряжении через корректирующий коэффициент [3]. Указанный коэффициент вычисляется по результатам периодических испытаний.

Многочисленными электромагнитными расчётами установлено, что для двигателей до 100 кВт отношение между сопротивлением при критическом скольжении r'_{2kp} и номинальном скольжении $r'_2(s_n)$ практически не зависит ни от типоразмера двигателя, ни от проводимости материала обмотки ротора:

$$r'_{2kp} \approx (1,03 \div 1,07) \cdot r'_2(s_n) \approx 1,05 \cdot r'_2(s_n). \quad (7)$$

С учётом этого выражение (3) после умножения на квадрат скольжения показывает, что при прочих равных условиях электромагнитный момент пропорционален величине

$$\frac{r'_2 \cdot s}{r_1^2 \cdot s^2 + 2,2 \cdot r_1 \cdot r'_2 \cdot s + 1,2 \cdot r_2'^2 + x_{kl}^2 \cdot s^2} = \frac{u}{v} = \frac{u}{v_1 + v_2 + v_3 + v_4} \quad (8)$$

Критическое скольжение находим, приравнявая нулю числитель производной выражения (8), которую находим следующим образом.

$$\frac{d u(s = s_{kp})}{ds} \approx r'_2 + \frac{\Delta r'_2}{s_{kp} - s_n} \cdot s_{kp} \approx 1,06 \cdot r'_2 \quad (9)$$

В соотношении (9) используется тот факт, что величина $\frac{s_{kp}}{s_{kp} - s_n}$ у рассматриваемых двигателей изменяется в узких пределах и в среднем составляет 1,15.

Далее находим:

$$\frac{d v_1(s = s_{kp})}{ds} = 2 \cdot r_1^2 s_{kp}; \quad (10)$$

$$\frac{d v_2(s = s_{kp})}{ds} \approx 2,33 \cdot r_1 \cdot r'_2; \quad (11)$$

$$\frac{d v_3(s = s_{kp})}{ds} \approx \frac{0,14 \cdot r'_2}{s_{kp}}; \quad (12)$$

$$\frac{d v_4(s = s_{kp})}{ds} = 2 \cdot x_{kikp}^2 \cdot s_{kp} + 2 \cdot x_{kikp} \cdot s_{kp}^2 \cdot \frac{d x_{kikp}}{ds}, \quad (13)$$

где x_{kIkP} индуктивное сопротивление двигателя при токе, соответствующем критическому скольжению.

Соотношения (1) и (4) позволяют получить простое выражение производной сложной функции $\frac{dx_{kI}}{ds} = \frac{dx_{kI}}{dI} \cdot \frac{dI}{ds}$ в соотношении (13)

$$\frac{d x_{kI}}{d s} \approx \frac{d}{d I}\left(a+\frac{b}{\sqrt[3]{I}}\right) \cdot \frac{d}{d s}\left(I_n \cdot s^q\right) \approx -\frac{b}{\frac{4}{3 \cdot s \cdot I^{\frac{2}{3}}}} \cdot I_n \cdot s^q \cdot q = -\frac{q}{3 \cdot s}\left(x_{kI}-a\right) \quad (14)$$

Из соотношений (9)-(14) получаем уравнение для определения критического скольжения:

$$\frac{d u\left(s=s_{kp}\right)}{d s} \cdot v\left(s=s_{kp}\right)-\frac{d v\left(s=s_{kp}\right)}{d s} \cdot u\left(s=s_{kp}\right) \approx L \quad (15)$$

$$L \approx s_{kp}^2 \cdot\left[-0,94 \cdot r_1^2-0,94 \cdot x_{kIkP}+x_{kIkP}\left(x_{kIkP}-a\right)\right] \cdot r_2^{\prime}+1,16 \cdot r_2^{\prime 3}=0$$

Из уравнения (15) находим выражение для расчёта критического скольжения:

$$s_{k p p} \approx \frac{1,2 \cdot r_2^{\prime}}{\sqrt{r_1^2+x_{kIkP}^2-0,7 \cdot q \cdot x_{kIkP} \cdot\left(x_{kIkP}-a\right)}} \quad (16)$$

Численное значение критического скольжения по результатам периодических испытаний определяется итерационным методом по следующей циклической схеме:

$$s^{(m)} \quad \Longrightarrow \quad x_{kp}^{(m)} \quad \Longrightarrow \quad s^{(m+1)} \quad (17)$$

Индуктивное сопротивление двигателя $x_{kp}^{(m)}$ вычисляется по соотношению (6) по заданному в m – м приближении скольжению $s^{(m)}$.

Скольжение $s^{(m+1)}$ в $(m+1)$ – ом приближении итерационной схемы (17) вычисляется по соотношению (16) при индуктивном сопротивлении двигателя $x_{kp}^{(m)}$.

Коэффициент $C_{s kp}$, корректирующий расчёт критического скольжения по результатам приёмо-сдаточных испытаний, вычисляется делением значения критического скольжения по результатам периодических испытаний на расчётное скольжение. Расчёт критического скольжения по результатам приёмо-сдаточных производится по соотношению (16) с умножением на коэффициент $C_{s kp}$.

Используя соотношения (3) и (16), вычисляем максимальный момент по результатам периодических испытаний:

$$M_{\max} \approx \frac{m_1 \cdot U_n^2 \cdot p \cdot \frac{r'_2}{s_{kp}}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \left[\left(r_1 + 1,1 \cdot \frac{r'_2}{s_{kp}} \right) + x_{kIkP}^2 \right]} \quad (18)$$

Величина максимального момента по результатам приёмо-сдаточных испытаний вычисляется по выражению (18) с умножением на корректирующий коэффициент $C_{\max}$.

Коэффициент $C_{\max}$ рассчитывается делением величины максимального момента по периодическим испытаниям на величину расчётного максимального момента $M_{\max}$. Он уменьшает погрешность, связанную с наличием допущений и дифференцированием эмпирически заданной зависимости индуктивного сопротивления двигателя от скольжения (тока) в процессе пуска.

Как показали многочисленные сравнительные расчёты с использованием составленных компьютерных программ ψ , погрешность вычислений по предложенной методике уменьшена в среднем на 3 % по сравнению с методикой, предложенной в работе [4], при этом максимальная погрешность составляет 4 % по всем параметрам.

Выводы:

1. Учёт насыщения путей потоков рассеяния и вытеснения тока в стержнях обмотки ротора в предложенном виде позволяет уточнить методику расчёта основных пусковых характеристик, максимального момента и критического скольжения по результатам приёмо-сдаточных испытаний.

2. Использование компьютерных программ, разработанных на базе предложенной методики, позволяет уменьшить трудоёмкость контроля качества изготовленных асинхронных двигателей.

Список литературы: 1. Гольдберг О.Д. Качество и надёжность асинхронных двигателей. – М.: Энергия, 1968. – 176 с. 2. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин. – М.: Высшая школа, 1990. – 255 с. 3. Клементьев А.В., Коцюбенко В.П. Усовершенствование методики применения круговой диаграммы при приёмо-сдаточных испытаниях асинхронных двигателей // Электротехника и электроэнергетика. – 2004. – №2/2004. – С. 48 – 50. 4. Клементьев А.В. Расчёт основных пусковых характеристик и максимального момента по результатам приёмо-сдаточных испытаний // Электрификация та АВТОМАТИЗАЦІЯ сільського господарства. – 2005. – №4(13). – С. 73 – 78. 5. Гаинцев Ю.В. Способы уменьшения погрешностей при определении моментов и пускового тока асинхронных двигателей. – М.: ЦНИИЭТ, 1963. 6. Вольдек А.И. Электрические машины. – М. -Л.: Энергия, 1974. – 839 с.

Поступила в редколлегию 18.10.07