

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕМОНТА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**А.И. Титко**, чл.-корр. НАН Украины, **В.М. Андриенко**, канд. техн. наук, **А.В. Худяков**, инж.  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

*Рассмотрена экспериментально-аналитическая методика определения качества ремонта асинхронных двигателей на основе данных опытов холостого хода и короткого замыкания поступившего из ремонта двигателя. Сравнение рассчитанных энергетических показателей с паспортными значениями позволяет сделать вывод о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя. Библи. 6, табл. 2.*

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, качество ремонта, энергетические показатели.

Заключение о пригодности электродвигателей к эксплуатации дается не только на основании сравнения результатов испытания с нормами, но и по совокупности результатов всех проведенных испытаний и осмотров. Значения величин, полученных при испытаниях, должны быть сопоставлены с исходными данными, а также с результатами предыдущих испытаний электрической машины [4].

Так же, как и на машиностроительных заводах, следует проверить гарантированные значения КПД,  $\cos \varphi$ , скольжения  $s$ , максимального момента при номинальном напряжении. Для двигателей мощностью  $P_n < 100$  кВт ГОСТ 7217-66 предписывает определять эти величины непосредственно из опытов, а для двигателей мощностью  $P_n > 100$  кВт допускается определение их с помощью круговых диаграмм, которые строятся по данным опытов холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ). Для электрической машины, поступившей на предприятие после ремонта, пригодны все методы поиска неисправностей [3, 5, 6]. Но для применения любого из известных методов требуются специальное оборудование и установка различных датчиков, что неприемлемо в условиях предприятия, где предполагается устанавливать двигатель.

Прежде чем производить монтаж рабочего агрегата, следует удостовериться в надлежащем состоянии двигателя. На первом этапе нужно использовать все возможные методы визуального контроля.

Критерием отсутствия скрытых дефектов могут быть получаемая от двигателя номинальная мощность и другие гарантированные величины из опыта нагрузки, как предписывает ГОСТ. Путем обработки экспериментальных данных можно рассчитать полезную мощность на валу и другие величины. Но на предприятии может отсутствовать экспериментальный стенд или требуется удостовериться в получении нужных величин до монтажа рабочего агрегата. В таком случае все величины можно рассчитать по круговой диаграмме, которая строится по данным опытов КЗ и ХХ. Для проведения этих опытов необходимы обычный набор электроприборов и источник регулируемого напряжения, например, потенциал-регулятор. (При отсутствии последнего данные опытов ХХ и КЗ нужно потребовать от поставщика отремонтированного двигателя). Но чтобы избежать громоздких графических построений и повысить точность, достаточно построить лишь окружность и на ней определить точку, соответствующую паспортному значению тока в искомом режиме поступившего из ремонта двигателя, так как двигатели не используют при токах, превышающих паспортные значения. В результате можно определить сдвиг по фазе первичного тока и коэффициент мощности, что позволит рассчитать потребляемую двигателем мощность, а ток статора представить в комплексном виде. Далее, аналитическим путем рассчитываются все требуемые величины, и при необходимости можно построить рабочие характеристики.

В лаборатории отдела моделирования электрических машин переменного тока Института электродинамики НАН Украины проводились испытания асинхронного двигателя с пас-

портными данными:  $P_n = 1,7$  кВт,  $U_n = 380$  В,  $I_n = 6,2$  А,  $n_n = 460$  об/мин. Были проведены опыты ХХ и КЗ для следующих случаев:

1. Двигатель без повреждений.
2. Двигатель с несколькими короткозамкнутыми витками одной фазы обмотки. Для этого искусственно были выведены наружу ответвления от витков и произведены замыкания с помощью тумблеров двух витков.
3. Двигатель с “поврежденным” подшипником, то есть искусственно был создан неравномерный воздушный зазор.

В опытах измерялись все три линейные или фазные величины и вычислялись их среднеарифметические фазные значения.

Согласно данным опыта ХХ определяем ток холостого хода  $I_0$  и потери  $P_0$ ; параметры холостого хода  $R_0, X_0$ .

По данным опыта короткого замыкания определяем потери КЗ  $P_k$ ; параметры короткого замыкания  $R_k, X_k$  и приведенное активное сопротивление ротора  $R_2' = R_k - R_1$ .

Далее, приведем пример определения параметров по опытным данным для второго случая, а в табл. 1 для всех случаев представим вычисленные величины параметров.

Таблица 1

Вид повреждения	$I_0$ , (А)	$P_0$ , (Вт)	$R_0$ , (Ом)	$X_0$ , (Ом)	$P_k$ , (Вт)	$R_k$ , (Ом)	$X_k$ , (Ом)
Без поврежд.	5,05	648	8,47	42,73	611	8,32	8,6
КЗ витки	5,16	816	10,2	41,4	614	9,09	9,56
Дефект подшипн.	4,9	600	8,34	44,13	630	8,69	12,94

Алгоритм определения энергетических показателей и рабочих характеристик двигателя, поступившего из ремонта, следующий:

- по одной из известных методик, например [2], строим круговую диаграмму. Считаем, что при любой неисправности двигатель работает при нагрузке, которой соответствует паспортное значение тока. Достаточно на построенной окружности определить точку, соответствующую этому значению тока. Соединив начало координат с полученной точкой, получим положение вектора первичного тока  $I_1$  и сдвиг по фазе  $\varphi_1$ , соответствующие реальному режиму работы двигателя при паспортном значении тока.

Далее, в примере приведена методика построения окружности круговой диаграммы для случая, когда двигатель имеет короткозамкнутые витки в одной из фаз. В соответствии с выбранной методикой [2] можно рассчитать все требуемые показатели. Но чтобы избежать громоздких графических построений и добиться большей точности, приведем аналитический метод решения:

- потребляемая мощность:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1;$$

- первичный ток в комплексном виде:

$$\dot{I}_1 = I_{1a} + jI_{1r},$$

где  $I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1$ ,  $I_{1r} = I_1 \sin \varphi_1$ ;

- ток намагничивания и его фаза:

$$I_m = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_1 + r_m}{x_1 + x_m}; \quad x_1 \approx x_2 = 0,5x_k; \quad I_{ma} = I_m \cos \alpha; \quad I_{mr} = I_m \sin \alpha; \quad \dot{I}_m = I_{ma} + jI_{mr};$$

- ток и электрические потери ротора:

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_1 - \dot{I}_m; \quad I_2' = \sqrt{(I_{2a}')^2 + (I_{2r}')^2}; \quad P_{эл2} = m_1 (I_2')^2 R_2';$$

– электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = P_1 - (P_{эл1} + P_{ст}) = P_1 - m_1 I_1^2 R_1 - P_{ст};$$

– электромагнитный момент:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} = \frac{P_{эм}}{2\pi f_1};$$

– максимальный момент и кратность максимального момента:

$$M_m = \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 c_1 [r_1 + \sqrt{(x_{\sigma 1} + c_1 x'_{\sigma 2})^2}]}; \quad k_m = \frac{M_m}{M_2},$$

где  $c_1 \approx 1 + \frac{x_{\sigma 1}}{x_m} \approx 1 + \frac{0,5x_k}{x_m};$

– скольжение и частота вращения:

$$s = \frac{P_{эл2}}{P_{эм}}; \quad n(\text{об/сек}) = n_1(1-s) = \frac{2\pi f_1}{p}(1-s);$$

– суммарные потери:

$$\sum P = P_{ст} + P_{мех} + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{доб};$$

где добавочные потери  $P_{доб} \approx 0,005P_1;$

– полезная мощность и момент на валу, коэффициент полезного действия:

$$P_2 = P_1 - \sum P; \quad M_2 = \frac{P_2}{2\pi n}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Если рассчитанное численное значение полезной мощности на валу и другие эксплуатационные показатели соответствуют паспортным значениям, то отремонтированный двигатель можно эксплуатировать.

Согласно изложенному алгоритму были выполнены расчеты по компьютерной программе в системе *Mathcad* для различных случаев, результаты которых приведены в табл. 2, где приняты следующие обозначения:  $P_1, P_2$  – потребляемая и полезная мощности на валу,  $P_{см}, P_{эл1}, P_{эл2}, P_{доб}, \sum P$  – соответственно сумма потерь в стали и механических, электрические потери в обмотке статора, то же ротора, добавочные потери, суммарные потери.

Таблица 2

Вид повреж.	$\cos \varphi$	$P_1$ , (кВт)	$P_{см}$ (Вт)	$P_{эл1}$ , (Вт)	$P_{эл2}$ , (Вт)	$P_{доб}$ , (Вт)	$\sum P$ , (Вт)	$P_2$ , (кВт)
Без повреж.	0,66	2,7	319	496	117,7	13,5	946,1	1,755
КЗ витки	0,645	2,639	472	496	120,5	13,2	1100	1,538
Дефект подшип.	0,435	1,780	290,3	496	134	8,9	929	0,851

Как видно, в двигателе без повреждений рассчитанная величина мощности на валу  $P_2 = 1,755$  кВт практически совпадает с паспортным значением. В двигателе с двумя короткозамкнутыми витками (при общем числе витков в фазе, равном 96)  $P_2 = 1,538$  кВт, а при дефекте подшипника –  $P_2 = 0,851$  кВт. Отклонения от паспортного значения составляют 9,8 и 49,9 % соответственно. Таким образом, расчет подтверждает наличие одной из неисправностей в двигателе. Проводить расчет остальных эксплуатационных показателей не имеет смысла, а двигатель должен быть отправлен для повторного ремонта.

Некоторая погрешность расчета, не превышающая  $\pm 5\%$ , может быть обусловлена следующими причинами:

1. В опытах холостого хода и короткого замыкания незначительно проявляется эффект вытеснения тока в стержнях ротора. Поэтому параметры, вычисленные согласно данным этих опытов, в некоторой мере отличаются от параметров при нагрузке [1].

2. Следует считаться также с влиянием нагрева, так как длительность опытов при измерении данных во всех фазах затягивается.
3. Неточный расчет добавочных потерь, так как их определение относится к специальным задачам.

При отсутствии неисправностей, если требуется, могут быть рассчитаны все эксплуатационные показатели и рабочие характеристики двигателя. Это зависимости частоты вращения  $n$  (или скольжения  $s$ ), первичного тока  $I_1$ , потребляемой мощности  $P_1$ , момента  $M_2$ , КПД  $\eta$ ,  $\cos \varphi$  от полезной мощности на валу  $P_2$ . Для этого, задаваясь на окружности точками, соответствующими токам в диапазоне  $I_1 = (0,3 \dots 1,1)I_{1н}$ , для каждого значения тока нужно выполнить расчеты по компьютерной программе, приведенной в примере.

**Выводы.** Для определения качества ремонта по предложенной методике нужно (при паспортном значении тока статора) рассчитать полезную мощность на валу. Если отклонение ее величины меньше паспортного значения более чем на 5 %, то это свидетельствует о наличии неисправности в двигателе, необходимости ее поиска и устранения.

**Пример определения параметров двигателя при короткозамкнутых витках в одной фазе по опытным данным.** По данным опыта XX при номинальном напряжении  $U_n = 220$  В определены:  $I_0 = 5,164$  А,  $P_{01} = 272$  Вт – средние фазные значения тока и мощности; рассчитаны параметры XX:  $Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = 42,6$  Ом;  $R_0 = \frac{P_0}{I_0^2} = 10,198$  Ом;  $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = 41,36$

Ом;  $\cos \varphi_0 = \frac{P_{01}}{U_0 I_0} = 0,239$ , потери XX:  $P_0 = 3P_{01} = 816$  Вт; сумма потерь в стали и механических:  $P_{sm} = 3(P_{01} - I_0^2 r_1) = 471,93$  Вт, где  $r_1 = 4,3$  Ом – активное сопротивление обмотки статора.

По данным опыта КЗ при номинальном токе  $I_n 6,2$  А определены:  $U_k = 82$  В;  $P_{k1} = 351$  Вт. Параметры КЗ:  $Z_k = \frac{U_k}{I_n} = 13,226$  Ом;  $R_k = \frac{P_k}{I_n^2} = 9,149$  Ом;  $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = 9,55$  Ом;  $\cos \varphi_k = \frac{P_{k1}}{U_k I_n} = 0,692$ ; потери КЗ:  $P_k = 3P_{k1} = 1055$  Вт; активное сопротивление ротора:  $r_2 = R_k - r_1$ .

#### Порядок построения окружности круговой диаграммы

Диаметр окружности  $D_{ок} = \frac{U_n}{X_k} = 23$ , радиус  $R_{ок} = \frac{D_{ок}}{2} = 11,5$ . По оси ординат откладываем вектор  $\dot{U}_n$  и под углом  $\varphi_0$  – вектор  $\dot{I}_0$ . Из конца этого вектора  $H_0$  проводим прямую, параллельную оси абсцисс, а под углом  $\alpha$  к ней строим диаметр окружности  $H_0C$ , и на нем строим окружность радиусом  $R_{ок}$ .  $\sin \alpha = \frac{2I_0 r_1}{U_n} = 0,202$ ,  $\text{tg } \alpha = 0,23$ .

При эксплуатации двигатель работает при паспортном значении тока  $I_n = 6,2$ . Из начала координат проводим окружность радиусом  $I_n = 6,2$ . Ее пересечение с основной окружностью дает нам точку искомого режима  $h$ .  $Oh$  – вектор первичного тока. Спроектировав его на ось ординат, получим точку  $t$ . Из круговой диаграммы определяем первичный коэффициент мощности искомого режима как отношение отрезков  $Ot/Oh$ ,  $\cos \varphi = 0,64$ .

1. Андриенко В.М., Клиндер К. Исследование параметров управляемых асинхронных двигателей // Электричество. – № 8. – С. 41–44.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
3. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин. двигателей // Электричество. – 2004. – № 8. – С. 41–44.
4. Гольдберг О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 159 с.

5. *Титко А.И., Осадчий Е.П., Шаломыгин М.В.* Программно-технический комплекс диагностики изоляции обмоток асинхронных двигателей // Новини енергетики. – 1998. – № 8. – С. 38–42.
6. *Титко О.І., Осадчий Е.П., Шаломигін М.В.* Експлуатаційний контроль енергоефективних асинхронних електродвигунів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка: Зб. наук. пр. – 1999. – С. 125–132.

УДК 621.313

**О.І. Титко**, чл.-кор. НАН України, **В.М. Андрієнко**, канд. техн. наук, **А.В. Худяков**, інж.

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Визначення якості ремонту асинхронних двигунів**

*Розглянуто експериментально-аналітичну методику визначення якості ремонту асинхронних двигунів згідно з даними дослідів холостого ходу та короткого замикання двигуна, який надійшов з ремонту. Порівняння отриманих енергетичних показників з паспортними даними свідчить про можливість подальшої експлуатації двигуна. Бібл. 6, табл. 2.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, якість ремонту, енергетичні показники.

**O.I. Tytko, V.M. Andriyenko, A.V. Khudyakov**

Institute of Elektrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

#### **Definition of quality of repair of asynchronous engines**

*The experimental - analytical technique of definition of quality of repair of asynchronous engines is considered on the basis of the given experiences of idling and short circuit of the engine which has arrived from repair. Comparison of the calculated power parameters with passport values allows to draw a conclusion on an opportunity of the further operation of the engine. References 6, tables 2.*

**Key words:** asynchronous electric motor, quality of repair, power parameters.

Надійшла 23.04.2013

Received 23.04.2013