

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

В.А. Рыбаков

В статье рассмотрены вопросы вибрационной диагностики электродвигателей, используемых в сельском хозяйстве. Показано, что каждый вид дефекта генерирует свою частоту колебаний. Приведены таблицы измерения виброскоростей для наблюдаемых электродвигателей за период 4 года. Выведена формула оценки остаточного ресурса электрических двигателей.

Ключевые слова: вибрационная диагностика, вибродатчики, электрический двигатель, дефекты электрических двигателей, ротор, статор.

Методы вибрационной диагностики обладают хорошей диагностической информативностью, и не смотря на то, что с их помощью нельзя анализировать состояние изоляции, имеют право на существование и применение в качестве одного из основных диагностических методов.

Анализируя сигналы с вибродатчиков, установленных на подшипниках электрических машин можно выявить достаточно много специфических причин повышенной вибрации, возникающих только в электродвигателях различного типа. Эти причины могут являться как прямым результатом наличия различных внутренних электромагнитных дефектов электрических машин, так и быть просто связанными со специфическими особенностями проявления электромагнитных процессов в обмотках и сердечниках, отражать особенности нормальной работы электродвигателей и генераторов в агрегатах.

Вибрации в двигателях переменного тока, в общем случае, могут вызываться, в основном, пятью силами электромагнитной природы, имеющими свои собственные частоты. Данные виды вибраций существуют во всех электрических машинах. При появлении какого-либо дефекта происходит увеличение пиков на определенных частотах:

– первая сила связана с частотой питающей сети F_1 , имеет пик на частоте 50 Гц, связана с ослаблением прессовки пакетов стали ротора или статора;

– вторая сила $F_{эм}$ генерирует колебания с частотой проявления электромагнитных процессов в меди и стали электрической машины, имеет пик на частоте 100 Гц, проявляется в вибрации сердечника и обмоток всех машин переменного тока, характеризует ос-

лабление прессовки пакета стали, обрыв или замыкание в обмотке;

– третья связана с частотой вращения электромагнитного поля в зазоре электрической машины и есть частное от деления частоты питающей сети на число пар полюсов статора

$$F_0 = \frac{F_1}{P}, \quad (1)$$

характеризуется эксцентриситетом внешней поверхности ротора.

– четвертая F_p связана с частотой вращения ротора и в асинхронных машинах всегда на несколько процентов меньше частоты вращения электромагнитного поля, появляется в результате обрыва или нарушения контакта в стержнях или кольцах «беличьей клетки»;

– пятая F_n вызывается наличием зубцово-пазовой структуры в зазоре электрической машины. Появляется по причине дефектов отдельных зубцов стали статора или эксцентриситета ротора. Вибрация может быть пропорциональна произведению частоты вращения на число пазов статора, ротора или их частоте биений. В результате прогиб ротора различен при повороте его на 90 градусов. Это всегда приводит, при частоте вращения ротора с частотой 50 Гц, к увеличенным вибрациям в вертикальном направлении с частотой в 100 Гц.

Основной признак того, что диагностируемый дефект имеет электромагнитную причину – мгновенное исчезновение его признаков в спектре вибрации после отключения электрической машины от сети [1].

Очень важным является то, что диагностика причин повышенной вибрации электрических машин должна проводиться при воз-

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

можно большей нагрузке двигателя. Если исследования проводятся на холостом ходу, то очень часто удается выявить только малую часть всех имеющихся в оборудовании электромагнитных дефектов.

Для успешной диагностики различных электромагнитных дефектов в электрических двигателях и генераторах необходим спектроанализатор с очень высокой разрешающей способностью, с числом спектральных линий, не меньшем, чем 3200.

Измерение вибрации на подшипниках электродвигателей и генераторов нужно всегда проводить в трех направлениях – вертикальном, поперечном и осевом, иначе потом будет невозможно провести полную диагностику состояния. Идеальным является синхронная регистрация сразу шести вибросигналов с двух подшипников электрической машины. Обычно это повышает достоверность диагнозов дополнительно не менее чем на 10%.

Приведем краткую сводку по электромагнитным дефектам электрических машин, которые можно эффективно диагностировать по спектрам вибросигналов. Здесь же приведем все характерные признаки каждого вида дефекта.

Наиболее важные дефекты статора, которые можно определить по вибропараметрам [2]:

- ослабление прессовки пакета стали, обрыв или замыкание в обмотке. Проявляются на частоте действия электромагнитных сил $F_{эм}$, равной двойной частоте питающей сети. Особое внимание следует уделять наличию дробных гармоник электромагнитной частоты – $1/2$, $3/2$, $5/2$ и т. д. от основной частоты. По значению частоты эти гармоники соответствуют основной и нечетным гармоникам питающей сети;

- эксцентриситет, эллипсность внутренней расточки статора относительно оси вращения ротора. Возникает обычно как дефект монтажа подшипниковых стоек, дефект состояния подшипниковых щитов или при деформации статора. В вибрации проявляется на частоте вращения поля в зазоре и на частоте электромагнитных сил 100 Гц. Иногда сопровождается появлением боковых гармоник. Обычно сопровождается неравенством вертикальной и поперечной составляющих соответствующих гармоник. Пространственный максимум гармоник соответствует направлению эксцентриситета, смещения оси статора. Наиболее просто диагностируется при снятии “розы вибраций”, когда датчик по-

следовательно перемещается по огибающей вокруг подшипника со смещением при каждом измерении на угол 30 – 45 градусов;

- неправильный взаимный осевой монтаж активных пакетов ротора и статора. Иногда для данного дефекта используется термин: “неправильная установка электромагнитных осевых разбегов”. При работе электрической машины, в результате сил магнитного притяжения, пакет ротора всегда стремится к положению точно под пакетом статора. Если этому будут препятствовать условия монтажа подшипников, то в неправильно установленном подшипнике, сдвинутом в осевом направлении, возникнут осевые нагрузки и вибрации. Подшипники достаточно быстро нагреются и выйдут из строя. Иногда ротор двигателя “утягивается” в осевом направлении валом механизма, что возможно при неправильном осевом монтаже всего механизма и в случае малой подвижности в соединительной муфте.

Основные дефекты ротора, диагностируемые по вибрации:

- эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения. На спектре вибросигнала этот дефект проявляется в усилении первой гармоники частоты вращения ротора. Усиливается частота действия электромагнитной силы, вокруг которой иногда появляются боковые гармоники, сдвинутые друг от друга на частоту скольжения ротора, умноженную на число полюсов;

- обрыв или нарушение контакта в стержнях или кольцах “беличьей клетки” в асинхронном двигателе. Обычно проявляется вблизи частоты вращения вала ротора и всегда сопровождается появлением боковых полюсов, сдвинутых относительно гармоники частоты вращения ротора на интервал, равный произведению частоты скольжения на число полюсов двигателя;

- ослабление прессовки всего пакета стали ротора или только в области зубцов. Сопровождается усилением второй гармоники питающей сети или, при ослаблении стали в области зубцов, появлением пазовой частоты ротора с боковыми полосами, сдвинутыми друг от друга на частоту, равную двойной питающей частоте.

Для определения величины остаточного ресурса используются кривые вибросостояний электродвигателей, полученные по результатам лидерной эксплуатации специально подготовленных для этой цели образцов оборудования. При этом эксплуатация ведется в нормальном рабочем режиме, но с более ин-

тенсивным нагружением для увеличения коэффициента эксплуатации.

В качестве основного вибрационного параметра для оценки технического состояния ЭД используют общее среднеквадратичное значение виброскорости V , мм/с.

В качестве основного вида специальных диагностических измерений использованы методики получения амплитуд и частот спектральных составляющих вибросигнала (спектральный анализ) в диапазоне частот 2 - 1000 Гц.

Фильтрация составляющих вибросигнала осуществляется узкополосными анализаторами или алгоритмическими (программными) методами с погрешностью $\pm 3\%$ по частоте.

В качестве дополнительных средств анализа вибросигнала при диагностических измерениях использованы методы анализа коэффициента эксцесса E , анализ амплитуд огибающих вибросигнала на резонансной частоте подшипника или датчика.

Измерения и регистрация контролируемых параметров вибрации должны проводиться на всех штатных точках ЭД, определяемых в зависимости от конструкции:

- на корпусе вблизи подшипников;
- на корпусе в месте крепления двигателя к фундаменту.

Измерение параметров вибрации проводилось в трех ортогональных проекциях: вертикальной плоскости, поперечной и осевой (совпадающей с осью вала).

Виброизмерительные преобразователи (ВИП) располагались в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97.

Каждая из выбранных точек ясно отмечалась на агрегате и зарегистрирована в журнале. Крепление ВИП к поверхности агрегата может осуществляться:

- резьбовым соединением на шпильке;
- с помощью магнита;
- на липкой ленте или с помощью воска;
- с помощью щупа - при оперативном контроле вибрации.

Поверхность контакта с ВИП должна быть ровной, хорошо обработанной и чистой. Ее шероховатость не может превышать $R = 2,5$.

Измерения проводились в течении 4-х лет ряде зерновых и животноводческих хозяйств Алтайского края с периодичностью,

приведенной в таблице 1. Периодичность определялась на основе нормативов [1].

Таблица 1

Периодичность измерений вибросостояний электродвигателей в зависимости от уровня вибраций.

Значение виброскорости, мм/с, СКЗ	Периодичность
0,45 - 2,8	1 раз в 5 мес
2,8 - 4,5	1 раз в 3 мес
4,5-7,1	1 раз в месяц
более 7,1	1 раз в месяц

Для демонстрации расчетов рассмотрены четыре электродвигателя 4А90Л4УЗ, установленных на агрегатах для приготовления травяной муки типа АВМ в АКУП «Центральный».

Периодичность работы 8 часов в день, исключая выходные. В каждом двигателе имелся дефект статора – распрессовка его листов. Результаты замеров виброскоростей приведены в таблицах 2 - 5. Вторым ЭД отказал на 850 день со дня начала наблюдений из-за человеческого фактора.

В третьем и четвертом электродвигателях, уже при первом измерении, были выявлены большие значения виброскоростей. В последнем двигателе отказ произошел по причине повреждения изоляции обмотки статора. При дефектации ЭД было выявлено, что повреждение обмотки произошло непосредственно над местом распушения листов стали статора. Таким образом, можно сделать вывод о том, что такой дефект статора, как распрессовка, вызывает значительное ускорение старения изоляции его обмотки. Объясняется это тем, что в месте дефекта происходит повышенное выделение теплоты из-за увеличения электрического сопротивления, что и приводит к ускоренному старению.

Результаты данного наблюдения позволяют выявить зависимость между виброскоростями и остаточным ресурсом электродвигателя. Первый электродвигатель в начале наблюдений был новым и его уровень вибраций был минимальным.

Таблица 2

Результаты замеров виброскоростей для первого электродвигателя

Прошедшее с первого замера время, дней	0	150	300	450	600	750	900	1050	1140
Виброскорость, мм/с, СКЗ	0,5	0,7	0,9	1,2	1,55	1,95	2,5	3,1	3,45

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

Таблица 3

Результаты замеров виброскоростей для второго электродвигателя

Прошедшее с первого замера время, дней	0	150	300	450	540	630	720	810	850
Виброскорость, мм/с, СКЗ	1,5	1,85	2,4	2,95	3,3	3,7	4,0	4,3	форс-мажорный отказ

Таблица 4

Результаты замеров виброскоростей для третьего электродвигателя

Прошедшее с первого замера время, дней	0	90	180	270	360	450	480	510	540
Виброскорость, мм/с, СКЗ	4,25	4,6	5	5,6	6,1	6,7	7,1	7,5	8,4
Прошедшее с первого замера время, дней	570	600	630	650					
Виброскорость, мм/с, СКЗ	9,9	11,4	12,8	отказ					

Таблица 5

Результаты замеров виброскоростей для четвертого электродвигателя

Прошедшее с первого замера время, дней	0	90	180	210	240	270	300	318
Виброскорость, мм/с, СКЗ	6,25	6,8	7,15	7,9	8,6	10	14	отказ

В [4] указано, что критическими значениями вибрации для подобного ЭД являются вибрации со скоростью 2,8 мм/с, 4,5 мм/с, 7,1 мм/с.

После достижения данных скоростей процесс разрушения двигателя ускоряется независимо от типа дефекта. Период времени, соответствующий изменению виброскорости от 0,5 мм/с до 2,8 мм/с, согласно таблицам составил примерно 1000 дней или около 5700 часов. Изменение виброскорости с 2,8 мм/с до 4,5 мм/с продолжалось в течении 390 дней или около 2200 ч.

От 4,5 мм/с до 7,1 мм/с двигатели работали примерно 350 дней или 1900 часов. От 7,1 мм/с до отказа двигатели работали примерно 200 дней или 1100 часов. Аналогичные данные были получено по другому агрегату такого же типа, установленному на ОАО «Прибрежный» Первомайского района. Такие же наблюдения велись за всеми аналогичными электродвигателями, установленными в данных хозяйствах, а также ОАО «Кубанка» Первомайского района. По результатам наблюдений были построены таблицы (приложение А), позволяющие прогнозировать остаточный ресурс ЭД для основных типов электрооборудования, используемого в АПК.

С точки зрения математической статистики величина остаточного ресурса является величиной случайной. Поэтому для получения его математического ожидания $R(t)$ (рисунок 1) определен интервал от величины T до величины $T_{пр}$, где T и $T_{пр}$ – назначенный

ресурс времени, характеризующий время его нормальной и сверхресурсной эксплуатации.

По результатам лидерной эксплуатации можно определить величину $R_i(T)$, отличную от величины $R(T)$ и являющуюся «остаточным ресурсом» в интервале времени $(T; T+t)$. Исходными данными для расчетов являются наработки T_i для m отказавших и $n-m$ неотказавших объектов на время лидерной эксплуатации t в интервале времени $(T; T+t)$.

Точной оценкой показателя $R_i(T)$ служит величина математического ожидания определяемая по формуле:

$$\bar{R}_i(t) = \frac{\sum_{i=1}^m T_i + (n-k-m)t}{n-k}. \quad (2)$$

В соответствии с принятыми условиями считается, что

$$R_i(T) \leq R(T) \text{ и } R_i(T) \leq t. \quad (3)$$

Если число лидерных объектов n мало (меньше 50), то рекомендуется определять доверительную оценку для показателя $R_i(T)$ при заданной доверительной величине безотказной работы P в интервале $(T; T+t)$. Нижняя доверительная оценка показателя $R_i(T)$ или «усеченный остаточный ресурс» определяется по формуле

$$R_i^H(T) = \bar{R}_i(t) - \frac{t}{2} \sqrt{\frac{P}{n(1-P)}}, \quad (4)$$

где $\bar{R}_i(t)$ – средний остаточный ресурс в интервале $(T; T+t)$, рассчитанный по формуле (1);

$P > 0,9$ – вероятность безотказной работы объекта в интервале $(T; T+t)$.

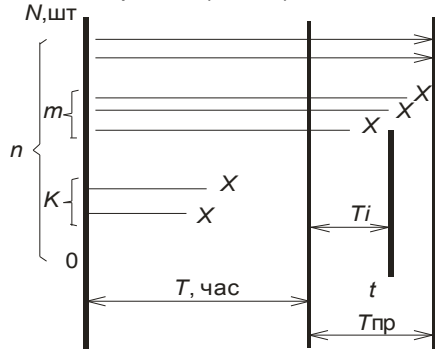


Рисунок 1 – Диаграмма распределения отказов электроприводов во времени

k – число отказавшего оборудования до момента времени T ; m – число отказавшего оборудования после времени T ; n – общее число оборудования от начала эксплуатации; T_i – наработка оборудования после времени T ; t – наработка не отказавшего оборудования.

Если у электроприводного оборудования в процессе эксплуатации отсутствуют отказы в интервале наблюдения за лидерными объектами, то первое слагаемое в формуле (4) определяется из выражения

$$\bar{R}_i(t) = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^m T_i + (n-m)t \right). \quad (5)$$

Найденные в данном разделе зависимости позволяют прогнозировать интенсивности выходов из строя электродвигателей для следующего планового периода:

$$\lambda(T_p) = \frac{\sum_{i=1}^n R_i T_i}{T_i}, \quad (6)$$

где T_i – длительность планового периода.

В обобщение материала данной статьи можно сделать следующие выводы:

- показано, что вибрационные методы диагностики технического состояния электродвигателей имеют достаточно высокую точность и информативность. На их основе возможно получение данных о состоянии практически всех основных узлов электрической машины;

- каждому дефектному узлу электродвигателя соответствует пик определенной частоты на вибрационной диаграмме. Степень развития дефекта зависит от величины данного пика в децибеллах;

- на основе анализа динамики изменения технического состояния электродвигателя и связанных с этим вибродиаграмм оказалось возможным выявить взаимосвязь между остаточным ресурсом ЭД и величиной характерного пика на спектре вибраций для основного электрооборудования АПК;

- была получена зависимость, позволяющая прогнозировать интенсивности выхода электродвигателей из строя. Знание данной интенсивности позволит более точно определять показатели системы массового обслуживания в будущих периодах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О вибрации лобовых частей выпных обмоток при ускоренных испытаниях асинхронных обдуваемых двигателей с короткозамкнутым ротором / К.Н. Вакуленко, В.Д. Главный, И.П. Лукьянов, Ю.А. Прокофьев // Электротехника. – 1973. - №8. – С.25-27.
2. Артемян, Г.Л. Вибрационная надежность асинхронных двигателей малой мощности // Электротехника. – 1990. - № 8. – С. 19-23.
3. ГОСТ 26656-85 Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. Взамен ГОСТ 23563-79, ГОСТ 24029-80, РД 50-498-84. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с.
4. Методические указания по проведению экспертизы промышленной безопасности ленточных конвейерных установок. / В.Л. Беляк, Г.Д. Трифанов. Утверждены приказом федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26 февраля 2006 г. N 125.

Рыбаков В.А., тел. (3852) 36-77-72