

УДК 621.313.33

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКАЗОВ ОБМОТОК СТАТОРОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРАНОВЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.В. Ведяшкин, О.П. Муравлев

Томский политехнический университет

E-mail: Vedyashkin@tpu.ru

Определены параметры законов распределения отказов и количественные показатели безотказности, характеризующие надежность обмоток статоров крановых асинхронных двигателей на стадии эксплуатации. Представленные данные по эксплуатационной надежности позволяют оценить влияние на них режима и условий эксплуатации и могут использоваться в сравнительных технико-экономических расчетах, а также при проектировании и изготовлении крановых асинхронных двигателей.

Ключевые слова:

Эксплуатационная надежность, асинхронные двигатели, обмотка статора, вероятность безотказной работы, наработка до отказа, законы распределения отказов.

Key words:

Serviceability, induction motor, stator winding, survival function, operating time to failure, the laws of failure distribution.

Введение

Надежность является одной из самых актуальных проблем современной техники. Эта проблема решается с применением методов теории надежности на всех этапах жизненного цикла электрических машин — при их проектировании, изготовлении и эксплуатации. Надежность как внутреннее свойство электрических машин сохранять свои параметры в заданных пределах и в заданных условиях эксплуатации зависит от очень большого числа факторов, носящих, как правило, случайный характер. В связи с этим задачу исследования надежности электрических машин (ЭМ), т. е., по существу задачу определения количественных характеристик надежности, целесообразно рассматривать, как задачу исследования вероятностных свойств ЭМ, функционирующих в реальных условиях, когда на них действуют случайные возмущения. Только на основе анализа надежности можно разработать мероприятия по повышению безотказности и долговечности электрических машин, обосновать межремонтные периоды, нормативы расхода сменного-запасных частей, объемы ремонтов и сформулировать требования по надежности применительно к заданным условиям эксплуатации и решить многие другие важные задачи. К сожалению, количественных данных по эксплуатационной надежности ЭМ крайне недостаточно для проведения серьезного инженерного анализа надежности. Про эксплуатационную надежность электрических машин часто упоминается в публикациях [1–5], но нигде не приводятся реальные данные.

Методика исследований

Как показали предварительные исследования надежности крановых асинхронных двигателей, наиболее слабым их звеном являются обмотки статоров, надежность работы которых будет рассмотрена далее.

Цель данной работы состоит в определении фактических значений показателей безотказности

статорных обмоток, характеризующих надежность крановых асинхронных двигателей на стадии эксплуатации.

Полученные результаты будут использованы для расчета показателей надежности при проектировании и изготовлении крановых асинхронных двигателей и совершенствовании системы их технического обслуживания и ремонта.

Для проведения исследования эксплуатационной надежности выбраны крановые асинхронные двигатели (КраД), установленные на мостовых кранах. Мостовые краны являются подъемно-транспортными машинами, к которым предъявляются повышенные требования по надежности и безопасности. Они оснащены специальными крановыми асинхронными двигателями одноступенчатой конструкции, что позволяет получить данные по эксплуатационной надежности, которые можно использовать при статистическом моделировании. Исследование эксплуатационной надежности асинхронных двигателей было проведено на современном предприятии ООО «Юргинский машиностроительный завод», которое выпускает горношахтное оборудование, автокраны, металлургическую продукцию и оборудование, является центром угольного машиностроения Кузбасса и одним из ведущих производителей горнодобывающего оборудования и автокранов в России.

Соответствие выпускаемой техники мировым стандартам обеспечивают наличие уникальной конструкторской базы, использование передовых технологий производства и управления, оснащение современным оборудованием и достойный уровень контроля качества. На предприятии установлено свыше 200 грузоподъемных механизмов от 0,5 до 100 т. Учитывая, что на грузоподъемные механизмы всегда обращают больше внимания и значительно лучше ведется документация по техническому обслуживанию и ремонтам, для оценки эксплуатационной надежности по данным эксплуатации выбраны крановые асинхронные двигатели.

ли, установленные на мостовых кранах [1, 2]. Основное количество мостовых кранов на предприятии эксплуатируется в течение 25–35 лет, что характерно практически для всех машиностроительных заводов России.

Для подготовки массива исходных данных об отказах КрАД была предварительно изучена и проанализирована эксплуатационная информация и материалы отчетов по техническому обслуживанию мостовых кранов. Кроме того, для получения более достоверных статистических данных об их работе была разработана специальная учетная форма, которая применялась при сборе данных. Из всего сказанного следует вывод о необходимости комплексного рассмотрения эксплуатационной надежности. При исследовании современных мостовых кранов необходимо учитывать работу асинхронных двигателей в следующих электроприводах: механизмы главного и вспомогательного подъемов, механизм передвижения моста мостового крана и механизмы передвижения тележек главного и вспомогательного подъемов [1, 2].

Сбор данных по эксплуатации асинхронных двигателей проводился по всем видам отказов КрАД за 2005–2009 гг. Причины отказов для мостовых кранов, работающих в стандартных окружающих условиях, и специальных подъемно-транспортных машин, которые работают при повышенной температуре окружающей среды и при наличии агрессивной среды: 68 % – отказы обмоток статоров, 30 % – отказы обмоток роторов и 2 % – отказы подшипниковых узлов. Значительная часть отказов приходится на обмотку статора КрАД. Поэтому в статье мы рассматриваем математическую модель, связанную с наработками на отказ статорных обмоток, которая является описанием системы, функционирующей в условиях различного рода возмущений, т. е. в реальных условиях, стохастической моделью системы.

Задача исследования надежности системы формулируется как задача исследования вероятностных свойств параметров системы, когда по заданным вероятностным характеристикам случайных параметров элементов определяются вероятностные характеристики параметров системы. Полной вероятностной характеристикой случайной величины является ее функция распределения, которую будем моделировать [3–6].

Компьютерная модель оценки параметров законов распределения отказов обмоток статоров по данным эксплуатации крановых асинхронных двигателей

Для оптимального управления любым производственным объектом очень важно иметь его математическую модель (ММ), характеризующую качественно и количественно реальный процесс поведения объекта под воздействием эксплуатационных факторов и описываемую с помощью того или иного адекватного математического аппарата. Математическая модель любых технических средств,

в том числе и КрАД, строится по результатам статистических наблюдений. Отправным пунктом построения ММ оценки эксплуатационной надежности КрАД должны быть согласующиеся с опытом эксплуатации допущения. В основе предлагаемой ММ лежат следующие допущения:

- считается, что наработки до отказа являются статистически независимыми;
- анализируемые объекты идентичны по устройству, назначению и условия эксплуатации относительно однородны;
- в качестве исходных данных для статистической обработки эксплуатационной информации применяются случайные наработки до отказов;
- для оценки и анализа эксплуатационной надежности в качестве основных вероятностей безотказной работы КрАД приняты функции распределения, которые адекватно сопоставляются с наработкой на отказ для электромеханических систем: нормальная, логарифмически-нормальная и функция распределения Вейбулла.

Опираясь на данные допущения, представляется возможным построить математическую модель, на базе которой можно дать строгое количественное описание процессов, влияющих на эксплуатационную надежность КрАД. В качестве исходных данных ММ мы рассматриваем эксплуатационную информацию объемом N , содержащую наработки t_i ($i=1,2,\dots,N$), которые являются наработками до отказов первоначально работающих КрАД, а также двигателей, работавших после замен или восстановлений.

Для оценки надежности КрАД по принятой информации может быть использован показатель вероятности безотказной работы $P(t)$. Эта функция обладает хорошей наглядностью, по ней легко определить остальные показатели надежности (функцию вероятности отказа $Q(t)$, среднюю наработку до отказа T_{cp} , интенсивность отказов $\lambda(t)$ и т. д.)

Под *вероятностью безотказной работы* КрАД понимается вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет. Вероятность безотказной работы является основной количественной характеристикой безотказности объекта на заданном временном интервале.

Разработанное программное средство позволяет оценить параметры для трех моделей надежности: Вейбулла, нормальной и логарифмически-нормальной. Как показали проведенные расчеты, для обмоток статоров КрАД можно использовать *нормальную модель надежности* и плотность распределения времени до отказа в этом случае описывается кривой Гаусса [7]

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-T_{cp})^2}{2\sigma^2}},$$

а функция ВБР равна

$$P(t) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{t - T_{cp}}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right],$$

где T_{cp} , σ – параметры нормального распределения (математическое ожидание и стандартное отклонение); $\operatorname{erf}(x)$ – функция ошибок [7]:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

Средняя наработка до отказа для нормальной модели надежности совпадает с параметром T_{cp} .

После получения оценок параметров моделей надежности, рассчитываются границы доверительных интервалов для этих параметров с доверительной вероятностью α , равной 0,90; 0,95 или 0,99.

Точность нормальной модели надежности оценивалась с помощью *коэффициента корреляции Пирсона* [6].

Поскольку математическая модель является основанием для создания программно-вычислительного комплекса по оценке эксплуатационной надежности электрических машин, дальнейшая ее интерпретация будет производиться с позиции компьютерной модели, которая включает:

- математическую модель, представляющую совокупность математических объектов и связей между ними, отражающих свойства объекта моделирования;
- математический аппарат, используемый для получения количественных результатов с помощью ММ;

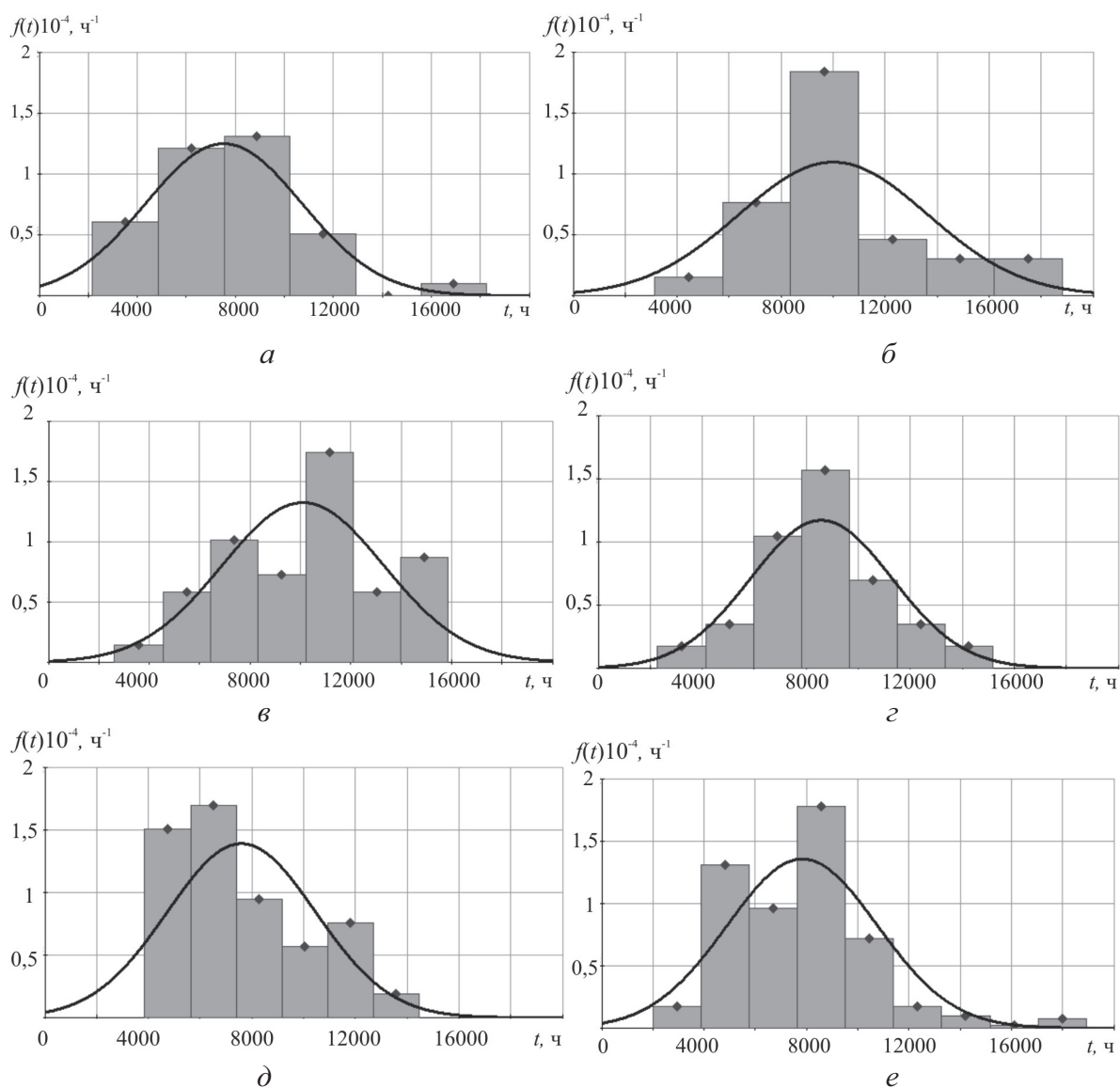


Рис. 1. Гистограммы наработки на отказ обмоток статоров крановых асинхронных двигателей: а) главный подъем; б) вспомогательный подъем; в) привод передвижения мостового крана; г) привод главной тележки; д) привод передвижения вспомогательной тележки; е) все приводы мостового крана

- программу, реализующую модель на компьютере.

В результате, абстрагируя основные существенные свойства интенсивности отказа и рассматривая их с позиции компьютерной модели, можно получить процедуру вычисления оценки накопленной интенсивности отказов.

Алгоритм определения надежности элементов мостового крана работает следующим образом:

- Ввод исходных данных различными способами: вручную, импорт из текстового файла, загрузка из сохраненного файла. Также пользователем должны быть введены значения Γ для вычисления значения гамма-процентной наработки и необходимое значение доверительной вероятности.
 - Производится обработка исходного массива данных (сортировка данных, определение стандартных статистических параметров).
 - Формирование значений массива значениями функции MedianRank , который используется для разных видов распределения (Вейбулла нормальный, логарифмически нормальный).
 - Вычисление вспомогательных функций для распределения Вейбулла, а также для нормального, логарифмически нормального распределения.
 - Уточнение значений определенного закона распределения, и определяются границы применимости соответствующего закона.
 - Вывод точностных характеристик параметров распределения и графиков.
- Задача решается следующим образом:
- находят массив исходных эксплуатационных данных для всех асинхронных двигателей мостового крана;
 - определяют типы законов распределения и количественные значения их параметров;
 - определяют фактические значения показателей надежности на основе полученных законов распределения.

Результаты моделирования

На основании эксплуатационных наблюдений и результатов моделирования законов распределения отказов обмоток статоров при эксплуатации КрАД на рис. 1 построены гистограммы и законы распределения наработок на отказ обмоток статоров.

Проведенные расчеты подтверждают, что отказы обмоток статоров для двигателей всех приводов мостовых кранов подчиняются нормальному закону распределения, который в теории надежности считается теоретически наиболее обоснованным в тех случаях, когда надежность технического устройства определяется большим количеством факторов, среди которых нет явно доминирующих. Для обмоток статоров эти требования всегда выполняются. При изготовлении обмоток

на их надежность влияет качество изоляционных материалов (витковая и корпусная изоляция, пропитывающий лак, технология изготовления), а в процессе эксплуатации – режимы работы двигателей и условия окружающей среды. Все эти факторы являются случайными величинами и определяют надежность обмоток статоров КрАД.

Функция вероятности безотказной работы, одна из основных показателей надежности, которые используются при проектировании, изготовлении, эксплуатации и совершенствовании системы технического обслуживания и ремонта КрАД, представлена на рис. 2.

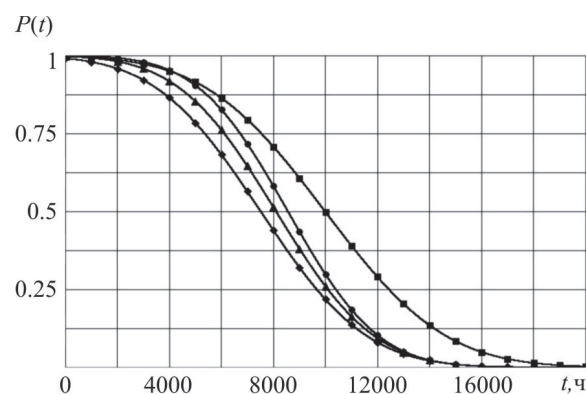


Рис. 2. Функция вероятности безотказной работы: ■ – главный подъем; ♦ – вспомогательный подъем; ● – привод передвижения вспомогательной тележки; ▲ – все приводы мостового крана

Таблица. Интервальные оценки средних наработок обмоток статоров КрАД

Тип привода мостового крана	N	$\bar{t}_{\min}, \text{ч}$	$\bar{t}, \text{ч}$	$\bar{t}_{\max}, \text{ч}$
Главный подъем	25	9526	9986	10446
Вспомогательный подъем	37	7327	7512	7697
Привод передвижения моста крана	39	7473	7561	7649
Привод передвижения вспомогательной тележки	25	8351	8559	8768
Привод передвижения главной тележки	30	7371	7578	7786
Все приводы мостового крана	156	8056	8101	8147

В таблице приведены экспериментальные данные и интервальные оценки средних наработок обмоток статоров КрАД с доверительной информацией 0,95 для главного и вспомогательного подъема, привода передвижения моста крана, приводов передвижения вспомогательной и главной тележек мостового крана и суммарные наработки всех приводов.

Следует отметить, что все асинхронные двигатели мостовых кранов работают в одинаковых условиях окружающей среды и их обмотки статоров прошли капитальный ремонт с применением одинаковой технологии изготовления и одностип-

ных материалов. Разные значения наработок объясняются различными режимами работы. В частности, главный подъем используется меньше других приводов при работе мостовых кранов, и наработка на отказ существенно выше всех остальных приводов.

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа, которые наряду с наработкой на отказ определяют эксплуатационную надежность крановых асинхронных двигателей, рассчитываются по рассмотренной математической модели.

Выводы

1. Разработан программно-вычислительный комплекс по оценке эксплуатационной надежности обмоток статоров крановых асинхронных двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брауде В.И., Семенов Л.Н. Надежность подъемно-транспортных машин. — Л.: Машиностроение, 1986. — 183 с.
2. Александров М.П. Грузоподъемные машины. — М.: Высшая школа, 2000. — 552 с.
3. Кузнецов Н.Л. Надежность электрических машин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2006. — 432 с.
2. Исследованы интервальные оценки средних наработок обмоток статоров главного и вспомогательного подъема, приводов передвижения моста крана, передвижения вспомогательной и главной тележек мостового крана.
3. Установлено, что отказы обмоток статоров крановых асинхронных двигателей подчиняются нормальному закону распределения, т. к. определяется большим количеством равномерно влияющих факторов (качество изоляционных материалов, режим работы и условия окружающей среды).
4. Определены параметры законов распределения отказов и количественные показатели безотказности приводов мостовых кранов, что может быть использовано для их проектирования, изготовления и технического обслуживания.
4. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. — М.: Олита, 2003. — 472 с.
5. Горский Л.К. Статистические алгоритмы исследования надежности. — М.: Наука, 1970. — 400 с.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

Поступила 02.09.2011 г.