

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР**
**ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

Аспирант М. И. МАКАРОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК**

Диссертация написана на русском языке

(Специальность 05.173— „Горная электромеханика“)

А в т о р е ф е р а т
диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК—1972

Министерство высшего и среднего специального образования
У С С Р

Донецкий ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

На правах рукописи

Аспирант М.И.МАКАРОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКО-
ВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ
УСТАНОВОК

Диссертация написана на русском языке

Специальность 05.173 - "Горная электромеханика"

Автореферат диссертации,
представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк - 1972

Диссертационная работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Промышленные исследования проведены на шахтах Донецкого бассейна.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Р.М.ЛЕБОВ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.А.ИВАНОВ,
кандидат технических наук А.Ф.БОРОДКИН.

Ведущее предприятие - Харьковский электромеханический завод.
Автореферат разослан "¹⁴....." марта..... 1972 года.

Защита диссертации состоится на заседании Ученого Совета горноэлектромеханического и механического факультетов Донецкого политехнического института "²⁸....." апреля..... 1972 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах по адресу: 340066, г.Донецк-66, ул.Артема, 58, Донецкий политехнический институт.

Ученый секретарь Совета



доцент К.Н.МОСКАЛОВ

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 годы предусматривается увеличение добычи угля до 685-695 млн. тонн и повышение производительности труда в горной промышленности в 1,4 раза.

Шахтные подъемные установки играют важнейшую роль в добыче полезного ископаемого, в обеспечении производительности и безопасности труда шахтеров. Переход к разработке глубоколежащих пластов, интенсификация очистных и подготовительных работ требуют непрерывного увеличения мощности и производительности шахтных подъемов. С увеличением производительности возрастает значение надежности, так как в этих условиях отказы грузовых подъемных установок приводят к значительной потере угледобычи из-за их простоев, отказы людских подъемов приводят еще и к появлению опасности для жизни людей. В связи с широким распространением на шахтных подъемных установках асинхронного привода работы по исследованию и повышению надежности этой системы привода следует считать первоочередными.

Благодаря работам институтов "Типроуглеавтоматизация", "Автоматормаш", "Автоматуглерудпром", Московского горного института и других в настоящее время созданы методики расчета и получены количественные показатели надежности аппаратуры и приборов автоматизации для угольной и горнодобывающей промышленности. Эти данные могут быть использованы при оценке надежности аппаратуры управления шахтными подъемными установками. В то же время исследования вопросов надежности одного из основных элементов привода - подъемного асинхронного двигателя, отсутствуют.

Недостаточное внимание вопросам надежности приводных электродвигателей не позволяет решать ряд практических задач по повышению

надежности не только подъемных асинхронных двигателей, но и системы привода шахтными подъемными установками в целом.

Перечисленные обстоятельства позволяют считать данную проблему актуальной.

Цель работы. Целью реферируемой работы является исследование комплекса вопросов эксплуатационной надежности высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок и на этой основе разработка рекомендаций по ее повышению.

Общая методика выполнения исследования. Диссертационная работа содержит результаты теоретических и промышленных исследований. Общая методика выполнения исследований основывается на использовании статистических данных об отказах подъемных асинхронных двигателей в производственных условиях для оценки их эксплуатационной надежности, в исследовании условий эксплуатации и их влияния на надежность электродвигателей, в разработке на этой базе основных направлений повышения надежности подъемных асинхронных двигателей. При теоретических исследованиях и обработке результатов наблюдений использовался математический аппарат теории вероятностей, математической статистики, теории надежности и теории нагрева.

Научная новизна. В работе впервые установлены математические модели отказов и получены количественные показатели надежности высоковольтных подъемных асинхронных двигателей и их основных конструктивных узлов. Установлена вероятностно-статистическая природа функционирования приводных асинхронных двигателей и получены законы распределения основных параметров их функционирования. Получены аналитические зависимости ресурса изоляции обмоток электродвигателей от различных эксплуатационных факторов как при раздельном, так и при комплексном их воздействии. На основе полученных зависимостей определены рациональные условия эксплуатации приводных асинхронных

двигателей с точки зрения обеспечения их планового срока службы. Разработана методика оценки экономической эффективности повышения надежности асинхронного привода шахтных подъемов и определена суточная производительность грузовой подъемной установки, при которой экономически целесообразно резервировать приводной электродвигатель.

Практическая ценность. Проведенные исследования дают возможность:

1. Конструкторским организациям определять надежность вновь проектируемых серий высоковольтных асинхронных двигателей и уже в процессе проектирования разрабатывать мероприятия по ее повышению;
2. Заводам-изготовителям целенаправленно проводить мероприятия по совершенствованию конструкции и технологии серийно выпускаемых высоковольтных асинхронных двигателей;
3. Работникам эксплуатации совершенствовать методы технической эксплуатации приводных асинхронных двигателей;
4. Ремонтным предприятиям планировать объем ремонтных работ по подъемным высоковольтным электродвигателям;
5. Оценивать экономическую эффективность мероприятий по повышению надежности электропривода шахтных подъемных установок.

Реализация работы в промышленности. На основе выполненных исследований разработаны "Технические предложения по повышению эксплуатационной надежности высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок", которые приняты Минуглепром УССР к реализации и внедряются на шахтах. Рекомендации по периодичности и объему ремонтных работ использованы ДовУТИ при определении рационального объема ремонта шахтного электрооборудования на ремонтных базах Минуглепром УССР.

Основные рекомендации по повышению конструктивной надежности высоковольтных асинхронных двигателей используются Харьковским электроме-

ханическим заводом при изготовлении серийно выпускаемых электродвигателей и учтены им при проектировании новой серии приводных асинхронных двигателей типа АКН-2.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на республиканской (Донецк, 1968) и областной научно-технических конференциях (Донецк, 1968), на научно-технических конференциях Донецкого политехнического института (1969г., 1971г.), на техническом совещании при Главном управлении энергомеханической службы и ремонтных предприятий МУП УССР (Донецк, 1971), на межкафедральном семинаре Донецкого политехнического института (1971г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 6 работ.

Объем работы. Реферлируемая работа изложена на 146 стр., состоит из 5 глав, иллюстрируется 28 рисунками, содержит 64 приложения и список литературы из 124 наименований.

ГЛАВА I. ПРОБЛЕМА НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК. ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.

В последние годы в горной промышленности вопросам надежности уделяется большое внимание. Проблема обеспечения высокой надежности горношахтного оборудования отнесена к числу основных научно-технических проблем развития угольной промышленности, подлежащих решению в 1971-1975 годах.

Обзор опубликованных исследований по проблеме надежности асинхронных двигателей показал следующее:

- исследованы вопросы повышения надежности низковольтных электродвигателей общепромышленного применения на этапах конструирования и изготовления, определены количественные показатели надежности также врубкомбайновых взрывобезопасных электродвигателей;
- наряду с этим установлено, что вопросы эксплуатационной надежности

и высоковольтных асинхронных двигателей освещены недостаточно, а данные о надежности асинхронных двигателей, используемых для привода шахтных подъемных установок, вообще отсутствуют.

В соответствии с этим в реферируемой работе были поставлены следующие задачи исследования:

1. Установление математических моделей отказов и определение количественных показателей надежности подъемных высоковольтных асинхронных двигателей и их основных конструктивных узлов;
2. Установление основных причин и видов отказов;
3. Исследование условий эксплуатации и их влияния на надежность асинхронных двигателей шахтных подъемных установок;
4. Разработка рекомендаций по повышению надежности подъемных асинхронных двигателей на стадиях конструирования, изготовления и эксплуатации;
5. Разработка методики оценки экономической эффективности повышения надежности асинхронного привода шахтных подъемов и определение суточной производительности грузовой подъемной установки, при которой экономически целесообразно резервировать приводной электродвигатель.

Основным источником сведений о надежности подъемных электродвигателей явились наблюдения за их эксплуатацией на шахтах в течение четырех лет (с 1965 по 1969 годы). Для сбора статистических данных о надежности были выбраны 59 асинхронных приводных двигателей 47 подъемных установок на 17 шахтах комбинатов "Донецкуголь" и "Макеев-уголь" МПЗ УССР. Предварительно была изучена генеральная совокупность подъемных электродвигателей, эксплуатирующихся в настоящее время в Донбассе, что дало возможность обеспечить репрезентативность выборки.

Для определения показателей долговечности была дополнительно

проведена обработка материалов о поступлении подъемных асинхронных двигателей в капитальный ремонт на Донецкий и Ворошиловградский энергозаводы за 6 лет (с 1964 по 1969 годы) от угольных комбинатов Минуглепром УССР с парком подъемных высоковольтных электродвигателей свыше 500.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

В главе установлены математические модели отказов и определены количественные показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности подъемных асинхронных двигателей и их основных конструктивных узлов, проанализированы основные виды и причины отказов.

Проверка однородности полученных статистических данных об отказах подъемных электродвигателей производилась с помощью видоизмененного критерия минимума хи-квадрат.

Рассмотрение основных свойств потока отказов подъемных электродвигателей (стационарности, ординарности и последствия) показало, что их отказы образуют простейший (однородный пуассоновский) поток. Близость реального потока отказов подъемных электродвигателей к простейшему подтверждена проверкой по критерию Пирсона ($\chi^2 = 4,24$; $K = 4$; $p = 0,378$). В этом случае наработка между отказами распределена по экспоненциальному закону с плотностью вероятности

$$f(t) = 0,124 \exp(-0,124 t). \quad (1)$$

Для сравнительной оценки безотказности отдельных конструктивных узлов электродвигателей использовался коэффициент отказов, равный отношению (в процентах) среднего числа отказов каждого узла к среднему числу отказов электродвигателя в целом. Результаты исследований приведены в табл. I. В этой же таблице приведены значения коэффициента профилактики, равного отношению числа отказов, выявленных

устраненных во время ревизий подъемных асинхронных двигателей к общему числу их отказов.

Таблица I

| Показатели безотказности | Числовые значения для узлов двигателя | | | | | | | Эл.двигатель в целом |
|--|---------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | № 1 | № 2 | № 3 | № 4 | № 5 | № 6 | № 7 | |
| Суммарное количество отказов за время наблюдения | 13 | 19 | 103 | 7 | 55 | 105 | 48 | 350 |
| Среднее число отказов | 0,221 | 0,322 | 1,75 | 0,129 | 0,933 | 1,78 | 0,813 | 5,95 |
| Коэффициент отказов, % | 3,7 | 5,5 | 29,4 | 2,0 | 15,7 | 30,0 | 13,7 | 100 |
| Число отказов, устраненных во время ревизий | 0 | 0 | 5 | 0 | 33 | 88 | 6 | 132 |
| Коэффициент профилактики | 0,0 | 0,0 | 0,05 | 0,0 | 0,6 | 0,838 | 0,125 | 0,377 |

№ 1 и № 2 - обмотка и сталь статора, № 3 и № 4 - обмотка и сталь ротора, № 5 и № 6 - подшипниковые и шесточный узлы, № 7 - механические элементы и крепежные детали (фундаментная плита, станна, крепежные болты, вал, соединительная муфта, стяжные шпильки, бандажы, пазовые клинья, вентиляционные распорки).

Для конструктивных узлов, имеющих высокий коэффициент отказов (их суммарный коэффициент отказов составил 88,8%) установлены законы распределения наработки между отказами. Теоретическая функция распределения для каждого узла выбиралась на основании анализа гистограмм и изучения причин отказов. Аналитическая оценка параметров теоретических функций распределения производилась методами максимального правдоподобия и моментов. Однако применение этих методов для конструктивных узлов, имевших за время наблюдения менее двух (или не одного) отказов приводит к значительным ошибкам, так как в этом случае эти наиболее надежные изделия не попадают в выборку. Поэтому для таких узлов полученные с помощью методов максимального правдоподобия и моментов теоретические функции служили только для

качественных оценок распределений, на основании которых в дальнейшем определялись доверительные интервалы параметров по методике обработки усеченных выборок.

Оценка согласия статистических распределений с теоретическими производилась аналитическим (по критерию Пирсона) и графоаналитическим (на вероятностной бумаге) способами.

Результаты исследований безотказности основных конструктивных узлов и подъемного электродвигателя в целом сведены в табл.2. Доверительные интервалы для наработки на отказ определены с достоверностью 0,9.

Таблица 2

| Наименование конструктивных узлов | Закон распределения наработки | Параметры критериев согласия | Нижняя доверительная граница наработки, месяц | Наработка на отказ, месяц | Верхняя доверительная граница наработки, месяц |
|--|-------------------------------|--|---|---------------------------|--|
| Обмотка ротора | Экспоненциальный | $\chi^2=0,829$; $K=3$; $P=0,8$ | 24,0 | 27,3 | 31,2 |
| Узел подшипника скольжения | Нормальный | $\sigma_m=0,108$; $\lambda=0,47$; $P=0,97$ | 41,7 | 43,1 | 44,5 |
| Щеточный узел | Нормальный | $\chi^2=4,46$; $K=3$; $P=0,22$ | 22,1 | 24,2 | 26,3 |
| Механические элементы и крепежные детали | Вейбулла | $\sigma_m=0,042$; $\lambda=0,21$; $P=1,0$ | 43,5 | 54,8 | 69,8 |
| Электродвигатель в целом | Экспоненциальный | $\chi^2=1,47$; $K=5$; $P=0,9$ | 7,55 | 8,07 | 8,7 |

Результаты исследований долговечности подъемных асинхронных двигателей, контактных щеток и вкладышей подшипников скольжения приведены в табл.3. При этом в качестве показателей долговечности для электродвигателей определялся срок службы между капитальными ремонтами, для вкладышей подшипников - срок службы до перезаливки, для контактных щеток - срок службы до замены.

Доверительные интервалы для срока службы определены с достоверностью 0,9.

Таблица 3

| Наименование изделий | Закон распределения срока службы | Параметры критериев согласия | Нижняя доверительная граница срока службы, лет | Срок службы, лет | Верхняя доверительная граница срока службы, лет |
|---------------------------------|----------------------------------|---|--|------------------|---|
| Контактные щетки | Логарифмический нормальный | $X^2=3,4$; $K=3$; $P = 0,34$ | 1,85 | 1,94 | 2,03 |
| Вкладыши подшипников скольжения | Нормальный | $\sigma_n = 0,031$; $\lambda = 0,254$; $P = 1,0$ | 3,66 | 4,04 | 4,42 |
| Подъемный электродвигатель | Нормальный | $X^2=1,664$; $K=5$; $P = 0,888$ | 9,97 | 11,03 | 12,1 |

Для установления зависимости надежности от длительности эксплуатации наблюдаемые подъемные электродвигатели объединялись в группы с одинаковым возрастным составом, для каждой из которых в отдельности подсчитывалось число отказов за год. Затем определялся параметр потока отказов конструктивных узлов, подверженных в процессе эксплуатации старению (обмотка статора и ротора, изоляция шпильки щеточного узла).

Установлено, что длительность периода приработки подъемных электродвигателей составляет три года, износные отказы обмотки статора наступают после 12 лет, обмотки ротора - после 8 лет, изоляция шпильки щеточного узла - после 6 лет эксплуатации. Приработочные отказы приводных асинхронных двигателей составляют 17,4%, внезапные - 44,3%, постепенные - 38,3% от общего числа их отказов. При этом приработочные отказы стали статора и ротора, механических элементов и крепежных деталей составляют соответственно 89,5% , 85,7%, 27,1% от числа отказов этих узлов, что свидетельствует о их некаче-

ственном изготовлении. Выяснение основных видов и причин отказов подъемных асинхронных двигателей позволило выявить ряд их конструктивных и эксплуатационных недостатков. В частности, причинами отказов одного из наименее надежных узлов - обмотки ротора, являются невысокая конструктивная надежность паяных соединений обмотки и перегрев ее из-за длительной работы электродвигателя с повышенным скольжением. Причинами отказов щеточного узла являются ослабление контакта в резьбовом соединении токоведущих шпилек с контактными кольцами, выбор контактных щеток несоответствующих марок, чрезмерное загрязнение контактных колец и щеток.

Ремонтопригодность подъемных асинхронных двигателей оценивалась по длительности устранения их отказов на рабочем месте и на ремонтных энергозаводах. Эмпирическое распределение времени восстановления подъемных электродвигателей на рабочем месте хорошо согласуется с экспоненциальным законом (параметры критерия Пирсона: $\chi^2 = 3,99$; $K = 5$; $p = 0,55$), времени капитальных ремонтов на энергозаводах - с логарифмически нормальным законом (параметры критерия Пирсона: $\chi^2 = 2,75$; $K = 3$; $p = 0,437$). Математическое ожидание времени восстановления на рабочем месте составляет 2,94 час., на энергозаводах - 34,7 суток.

Сравнительная оценка ремонтнопригодности отдельных конструктивных узлов асинхронных двигателей производилась по среднему времени ремонта и с помощью коэффициента восстановления, равного отношению времени восстановления отдельного узла к общему времени восстановления электродвигателя. Оказалось, что наиболее частыми являются простои, связанные с перепайкой соединений обмотки ротора, которые составляют 30,7% от суммарного времени восстановления электродвигателей на рабочем месте. Коэффициенты восстановления подшипникового узла, щеточного узла, крепежных и механических деталей составляют соот-

ветственно 23,2%; 21,8%; 20,8%.

Результаты исследований, приведенные в этой главе, явились основой для разработки рекомендаций заводам-изготовителям по модернизации выпускаемых высоковольтных асинхронных двигателей, работникам эксплуатации - по дальнейшему совершенствованию методов технической эксплуатации подъемных электродвигателей.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЪЕМНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В главе приведены результаты исследований фактической нагрузки, длительности регулирования скорости, температуры окружающего воздуха и нагрева асинхронных двигателей шахтных подъемных установок в условиях эксплуатации.

Вследствие особенностей работы шахтных подъемов, эксплуатационные факторы, влияющие на надежность приводных электродвигателей, подчиняются вероятностно-статистическим закономерностям.

Измерение фактического тока всех наблюдаемых 59 подъемных асинхронных двигателей и сравнение его с номинальным током показало, что коэффициент нагрузки этих электродвигателей распределен по нормальному закону. Основные параметры полученных распределений и параметры критериев, применяемых для оценки согласия эмпирических распределений с теоретическими, приведены в табл.4.

Характерной особенностью работы действующих подъемных установок является непостоянство продолжительности циклов, которое обуславливается изменением времени движения в течение цикла и изменением продолжительности технологической паузы. Выяснены основные причины этих изменений и установлены законы распределения длительности технологической паузы и времени движения плетевой и двух скиповых (с ручным управлением и автоматизированной) подъемных установок. Основные параметры этих распределений приведены в табл.4.

Таблица 4

| Эксплуатационные параметры | Закон распределения и значения его параметров | Параметры критериев согласия | Нижняя доверительная граница | Среднее значение | Верхняя доверительная граница |
|---|---|--|------------------------------|------------------|-------------------------------|
| Коэффициент нагрузки электродвигателей скиповых подъемов | Нормальный $\alpha = 0,925$ $\sigma = 0,19$ | $D_m = 0,071$ $\lambda = 0,376$ $P = 0,998$ | 0,864 | 0,925 | 0,986 |
| То же, на электродвигателях клетевых подъемов | Нормальный $\alpha = 0,885$ $\sigma = 0,15$ | $D_m = 0,0735$ $\lambda = 0,409$ $P = 0,997$ | 0,839 | 0,885 | 0,931 |
| Длительность технологической паузы скипового подъема | Логарифмически нормальный $\lg x = 1,28$ $\sigma = 0,215$ | $X^2 = 2,73$ $K = 5$ $P = 0,739$ | 19,9сек | 21,5сек | 23,1сек |
| То же, но клетевого подъема | Логарифмически нормальный $\lg x = 1,455$ $\sigma = 0,0916$ | $X^2 = 5,85$ $K = 5$ $P = 0,323$ | 28,4сек | 29,1сек | 29,9сек |
| Время движения за цикл угольного скипового подъема с ручным управлением | Нормальный $\alpha = 101,1$ $\sigma = 11,4$ | $X^2 = 2,02$ $K = 5$ $P = 0,819$ | 99,4сек | 101,1сек | 102,8сек |
| То же, но клетевого подъема | Нормальный $\alpha = 123,3$ $\sigma = 7,56$ | $X^2 = 2,94$ $K = 5$ $P = 0,7$ | 122,4сек | 123,3сек | 124,2сек |
| То же, но автоматизированного скипового подъема | Нормальный $\alpha = 80,35$ $\sigma = 3,6$ | $X^2 = 4,01$ $K = 5$ $P = 0,549$ | 79,8сек | 80,3сек | 80,8сек |
| Максимальное превышение температуры обмоток статора | Логарифмически нормальный $\lg x = 1,757$ $\sigma = 0,0922$ | $X^2 = 2,5$ $K = 5$ $P = 0,76$ | 55,6° | 58,5° | 61,4° |

Сравнение фактических диаграмм скорости с проектными показало, что длительности периодов разгона и замедления скорости подъемных установок значительно выше проектных; особенно длительны периоды дотяжки скиповых подъемов и периоды движения с пониженной равномерной скоростью клетевых подъемов перед подходом к приемной площадке, которые вообще не предусмотрены проектной диаграммой. Фактическое время движения скиповых подъемных установок в среднем в 1,28 раза, а клетевых - в 1,35 раза больше проектного.

На основе статистической обработки большого количества диаграмм получена обобщенная (усредненная) диаграмма фактических скоростей и тока электродвигателей за подъемный цикл, которая может быть использована для уточнения тепловых расчетов при конструировании и улучшения методов стендовых испытаний подъемных асинхронных двигателей.

Характерной особенностью работы подъемных электродвигателей является также высокая температура окружающего воздуха, которая в летнее время, как показали измерения в 47 зданиях шахтных подъемных установок (измерения проводились в июле-августе месяце), в среднем составляет 45°C . Температура воздуха в зданиях 85,1% обследованных подъемных установок превышает максимально допустимую ГОСТ 183-66 (40°C); температура воздуха во всех обследованных зданиях выше максимально допустимой по ГОСТ 183-55 (35°C), в соответствии с которым изготовлено большинство эксплуатирующихся в настоящее время подъемных электродвигателей. Основной причиной высокой температуры окружающего воздуха является неэффективная вентиляция зланий подъемов и неэффективное охлаждение роторных сопротивлений, которые при длительном и глубоком регулировании скорости приводных асинхронных двигателей нагреваются до 300°C .

Проведенные тепловые испытания позволили выяснить общую картину тепловых режимов электродвигателей скиповых и клетевых подъемных установок и установить особенности их нагрева в условиях эксплуатации, выяснить основные причины недопустимого нагрева ряда подъемных асинхронных двигателей, установить закон (логарифмически нормальный) распределения максимальных превышений температур обмоток статора (табл.4).

Характерной особенностью эксплуатационного нагрева приводных электродвигателей является неустановившийся тепловой режим с резкими колебаниями температуры, которая после непрерывной работы подъемной установки в течение 1-2 часа достигает своего максимального значения, часто превышающего допустимую для изоляции класса А.

Основными причинами перегрева подъемных электродвигателей являются работа с пониженной скоростью из-за неудовлетворительной армировки створа (37,5%), отсоединение секций обмотки статора из-за межвиткового замыкания в ней (18,75%), перегруз (18,75%), значительная неравномерность воздушного зазора из-за эллипсности ротора и статора (12,5%), заводские дефекты активной стали статора и ротора (12,5%).

Наиболее нагретыми частями электродвигателей являются обмотка и сталь ротора, наименее - лобовая часть обмотки статора, при этом разница между их температурами достигает 40-60°C. Наблюдается значительная разница между температурой пазовой и лобовой частями обмотки статора, которая в среднем составляет 30-40°C, а также неравномерность нагрева пазовой части обмотки статора. Для количественной оценки неравномерности нагрева пазовой части обмотки применяется коэффициент, равный отношению (в процентах) максимальной разности температур, измеренных в различных точках пазовой части обмотки по окружности статора, к среднеарифметическому значению. Получено значение

рическое распределение коэффициента неравномерности. Среднеарифметическое значение этого коэффициента оказалось равным 10%, что для температур, наиболее часто встречающихся в подъемных двигателях, составляет 8-10°C. Наиболее распространенными причинами неравномерности нагрева пазовой части обмотки являются неравномерность воздушного зазора между статором и ротором, дефекты активной стали статора, неодинаковый ток в фазах из-за неравномерности воздушного зазора, отсоединения секций обмотки при межвитковом замыкании в ней, несимметричности роторных сопротивлений по фазам.

Результаты исследований эксплуатационного нагрева сравнивались с результатами типовых заводских испытаний подъемных электродвигателей, производившихся на ХЭМЗ в течение семи лет (с 1960 по 1967 годы). Это сравнение показало, что тепловые испытания на заводах-изготовителях не учитывают многообразных условий эксплуатации подъемных электродвигателей и не гарантируют их от недопустимого нагрева при эксплуатации.

Проведенные исследования явились основой для разработки рекомендаций по улучшению тепловых условий эксплуатации подъемных асинхронных двигателей и повышению их долговечности.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА НАДЕЖНОСТЬ ПОДЪЕМНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В главе рассмотрено влияние температуры окружающего воздуха, длительности и глубины регулирования скорости, нагрузки подъемных электродвигателей на ресурс изоляции обмоток. Рассмотрено также комплексное влияние тепловых условий эксплуатации на ресурс изоляции обмоток.

Для количественной оценки износа изоляции был принят коэффициент ресурса изоляции, равный отношению ресурсов изоляции при фактических и номинальных условиях. В реферируемой работе получены

аналитические зависимости этого коэффициента от различных эксплуатационных факторов.

Зависимость коэффициента ресурса изоляции A_R от температуры окружающей среды имеет вид

$$A_R = \exp \left\{ -\alpha \left[\Delta \theta_{\text{окр}} + T_N - T_N \gamma_N C_N \frac{0,94 + 0,004 \theta_{\text{окр}}}{1,1 \gamma_C} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\Delta \theta_{\text{окр}}$ - разность между допустимой и фактической температурой окружающего воздуха;

T_N - допустимое превышение температуры изоляции обмотки;

$\theta_{\text{окр}}$ - фактическая температура окружающего воздуха;

α - постоянный коэффициент, зависящий от рода изоляционного материала;

γ_N, C_N - удельный вес и теплоемкость окружающего воздуха при допустимой температуре;

γ_C - то же, но при фактической температуре.

Приведенная зависимость (2) получена с учетом влияния температуры окружающего воздуха на превышение температуры изоляции обмоток электродвигателя. Это влияние, вызванное изменением сопротивления обмоток, производительности вентиляционной системы и коэффициента теплоотдачи электродвигателя при изменении температуры окружающего воздуха, экспериментально проверено на двух подъемных электродвигателях типа АКВ-15-51-16.

Получена аналитическая зависимость коэффициента ресурса изоляции от температуры окружающего воздуха не только при ее стационарном значении, но и при линейном изменении температуры в функции времени.

На основании полученных зависимостей определена температура окружающей среды, при которой обеспечивается плановый срок службы подъемных электродвигателей (26,4 года) без капитальных ремонтов

(без перемотки):

$$\theta_{\text{доп}} = \frac{\theta - 0,835 \tau_n}{1 + 0,00355 \tau_n}, \quad (3)$$

где θ — допустимая температура изоляции обмотки.

Для асинхронных двигателей с изоляцией класса А эта температура составляет 29–30°C, с изоляцией класса В — 35°C.

Зависимость коэффициента ресурса изоляции от окружной скорости ротора имеет вид

$$a_n = \exp \left[-\alpha \tau_n \left(\frac{\sqrt{U} - \sqrt{U_n}}{1 + \sqrt{U}} \right) \right], \quad (4)$$

где U_n, U — соответственно номинальная и фактическая окружные скорости ротора асинхронного двигателя.

Влияние длительности работы электродвигателя с пониженной скоростью вращения на износ изоляции обмоток можно оценить с помощью уравнения

$$a_n = \exp \left\{ -\alpha \tau_n \left[1 - \kappa + \left(\kappa - \frac{\tau_0}{\tau_n} \right) \exp \left(-\frac{t}{\kappa \tau_n} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $\kappa = \frac{1 + \sqrt{U_n}}{1 + \sqrt{U}}$;

τ_n — постоянная времени нагрева при номинальной скорости вращения асинхронного двигателя;

τ_0 — превышение температуры в начальный момент времени.

Зависимость коэффициента ресурса изоляции от коэффициента нагрузки электродвигателя имеет вид

$$a_n = \exp \left[-\alpha \tau_n \frac{1 - \kappa_n^2}{1 + \xi} \right], \quad (6)$$

где κ_n — коэффициент нагрузки;

ξ — отношение постоянных потерь к переменным потерям в электродвигателе.

При изменении во времени параметров функционирования подъемных асинхронных двигателей износ изоляции определяется интегрированием уравнений (4), (5), (6). В работе даны решения для случая линейного

изменения этих параметров в функции времени.

На основе полученных зависимостей определен коэффициент нагрузки, при котором обеспечивается плановый срок службы электродвигателей:

$$K_H = \sqrt{\frac{(\theta - \theta_{\text{опр}})(\xi + 1) - T_H \xi}{T_H}} \quad (7)$$

Оказалось, что для электродвигателей с изоляцией класса А коэффициент нагрузки в этом случае составляет 0,82, с изоляцией класса В - 1,0.

При оценке комплексного влияния тепловых условий эксплуатации на ресурс изоляции обмоток подъемных электродвигателей можно пользоваться уравнением

$$a_n = \exp \left\{ -\alpha \left[\Delta \theta_{\text{опр}} + T_H - T_H \gamma_n C_n \frac{\xi + K_n^2}{\xi + 1} \frac{1 + \sqrt{U}}{1 - \sqrt{U}} \frac{0,94 + 0,004 \theta_{\text{опр}}}{1,1 \gamma C} \right] \right\} \quad (8)$$

В процессе эксплуатации изоляция обмоток статора и ротора под воздействием различных эксплуатационных факторов теряет монолитность, что часто приводит к уменьшению ее теплопроводности и увеличению превышения температуры обмотки при неизменности греющих потерь. С целью выяснения качественных закономерностей изменения превышения температуры при старении изоляции обмоток асинхронных двигателей были проведены тепловые испытания низковольтных электродвигателей (типа ВАО-22-4 и ВАО-32-4) во время их стендовых ускоренных испытаний на надежность в лаборатории ВНИИВЭ.

Для оценки изменения превышения температуры в зависимости от времени искусственного старения изоляции использовались методы корреляционного анализа. Удалось установить, что уравнение регрессии для электродвигателей типа ВАО-22-4 имеет вид

$$y = 0,017x + 22,2; \quad (9)$$

для электродвигателей типа ВАО-52-4

$$y = 0,0198x + 9,31, \quad (10)$$

где y - превышение температуры обмотки статора;

x - время старения.

Если эту зависимость условно распространить на изоляцию класса А и В, то изменение превышения температуры обмотки электродвигателя из-за старения изоляции составит в конце срока его службы 12,5-17%. При этом расчеты показывают, что увеличение превышения температуры за счет ухудшения теплопроводности изоляции на 5, 10 и 20% приводит к уменьшению ресурса изоляции класса А соответственно в 1,3; 1,69 и 2,87 раза.

Полученные аналитические зависимости ресурса изоляции от различных эксплуатационных факторов позволяют оценить долговечность подъемных асинхронных двигателей на стадии проектирования, а также могут быть использованы для дальнейшего совершенствования методов их технической эксплуатации и при разработке методики ускоренных испытаний высоковольтных электродвигателей на надежность. Графическое представление в работе полученных зависимостей упрощает их практическое использование.

ГЛАВА 5. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ПОДЪЕМНЫХ УСТАНОВОК

В главе рассмотрены вопросы повышения надежности приводных электродвигателей на стадиях конструирования, изготовления, эксплуатации и методы их резервирования; дана экономическая оценка способов повышения надежности.

На основании анализа основных видов и причин отказов разработаны рекомендации по повышению конструктивной надежности подъемных асинхронных двигателей. Рекомендовано принять более теплостойкую изоляцию (класса В и литую терморезистивную) для обмоток статора,

применять подшипники качения, изменять технологию пайки соединений обмоток ротора, более широко применять принудительную вентиляцию электродвигателей, изменить конструкцию крепления роторной шпиль, ступицы ротора и контактных колец на валу, пазовых клиньев обмоток, резьбовых соединений токоведущих шпилек щеточного узла, конструкцию стягивающих бандажей ротора и крышки верхнего вкладыша подшипника скольжения.

Обоснованы сроки действия гарантий заводов-изготовителей (не менее трех лет с момента ввода электродвигателя в эксплуатацию) и комплект запасных частей (пятнадцать комплектов щеток, один комплект щеткодержателей, четыре комплекта токоведущих шпилек, два вкладыша подшипников скольжения, документация в двух экземплярах), необходимых на весь срок службы подъемных асинхронных двигателей. Обоснованы содержание и объем ежегодных осмотров и годовых ревизий; периодичность проведения капитальных ремонтов электродвигателей (каждые три года) и профилактических ремонтов с целью исключения износовых отказов обмотки статора (через II-12 лет), обмотки ротора (через 7-8 лет), изоляции шпилек щеточного узла (через 6 лет).

Основные рекомендации по периодичности проведения ремонтно-профилактических работ приняты к реализации Минуглепром УССР, внедрены на шахте им. XXI съезда КПСС комбината "Красноармейскоуголь" и дали положительный эффект.

Определены годовые нормы (в зависимости от числа эксплуатирующихся асинхронных двигателей) поступления в капитальный ремонт подъемных высоковольтных электродвигателей, нормы поступления вкладышей подшипников скольжения в ремонт (для перезаливки бабитом) и нормы потребления комплектов контактных щеток. Определение годовых норм поступления в ремонт электродвигателей позволяет заранее подготовить базу ремонтных предприятий и сократить длительность ремонтов.

Наиболее радикальным средством повышения надежности асинхронного привода шахтных подъемных установок является резервирование. Анализ различных способов резервирования приводных электродвигателей показал, что наиболее целесообразно осуществлять ненагруженное резервирование (с восстановлением резерва) однодвигательного привода шахтных подъемных установок. Разработано схемное решение этого вида резервирования. Рекомендации по резервированию приняты Минуглепром УССР и внедрены на шахтах "Ново-Центральная" комбината "Донецкуголь" и им. XXI съезда КПСС комбината "Красноармейскуголь".

Повышение надежности подъемных асинхронных двигателей связано с определенными материальными затратами, которые должны окупаться за счет снижения эксплуатационных расходов. Для обоснования мероприятий по повышению надежности асинхронного привода разработана методика определения их экономической эффективности.

Основная часть убытков при отказах подъемных электродвигателей связана с недовыработкой продукции и формируется за счет увеличения условно-постоянных расходов в себестоимости угля и недополучения прибыли:

$$Y = (Z - C + W_{\text{пост.}}) Q_{\text{час.}} t_0 m_{\text{ср.}}, \quad (\text{II})$$

где Y - годовой ущерб;

Z, C - оптовая цена и себестоимость тонны угля;

$W_{\text{пост.}}$ - условно-постоянные расходы предприятия, приходящиеся на 1 т угля;

$Q_{\text{час.}}$ - часовая производительность подъемной установки;

t_0 - среднее время ремонта приводного электродвигателя;

$m_{\text{ср.}}$ - среднее число отказов асинхронного двигателя в год.

Годовой экономический эффект от повышения надежности асинхронного привода равен

$$\Delta M_{\text{ср.}} = I, \text{Б} \Delta m_{\text{ср.}} Y - E_n \Delta K, \quad (\text{I2})$$

где $\Delta m_{\text{ср.}}$ - выигрыш в надежности, выраженный разностью среднего числа отказов приводных электродвигателей до и после

повышения надежности;

I, I_5 - коэффициент, учитывающий экономию на неплановых и плановых ремонтах, на запасных частях и на амортизационных отчислениях;

E_n - нормативный коэффициент капитальных вложений;

ΔK - дополнительные капитальные затраты на обеспечение повышения надежности.

Расчеты по уравнению (12) показывают, что условный годовой экономический эффект (в расчете на одну подъемную установку с суточной производительностью 3000 т угля) от внедрения рекомендаций по повышению надежности асинхронных двигателей на стадии эксплуатации составляет около 67 тыс.руб., на стадиях конструирования и изготовления - соответственно свыше 39 и 2,5 тыс.руб.

Сравнение ущерба, вызванного отказами подъемных асинхронных двигателей, и годовых расходов на их резервирование позволило определить часовую производительность подъемной установки Q час, при которой экономически целесообразно резервировать приводной электродвигатель:

$$Q_{\text{час}} \geq \frac{E_n \cdot \Delta K}{(X - c + \omega_{\text{лет}})(t'_e m'_{ex} - t''_e m''_{ex})}, \quad (13)$$

где t'_e, m'_{ex} - среднее время восстановления и среднегодовое число отказов подъемных электродвигателей до резервирования,
 t''_e, m''_{ex} - то же, но после резервирования.

Расчеты показывают, что при капитальных затратах на резервирование порядка 15000 руб, экономически выгодно резервировать приводной электродвигатель при суточной производительности подъемной установки свыше 380 т.

Целесообразность резервирования подтверждается также результатами расчетов экономической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Использование основных положений теории вероятностей, математической статистики и теории надежности при анализе результатов четырехлетних наблюдений за эксплуатацией 59 асинхронных приводных двигателей 47 подъемных установок на 17 шахтах и данных о поступлении подъемных электродвигателей в капитальный ремонт в течение шести лет на Донецкий и Ворошиловградский энергозаводы позволило определить количественные показатели безотказности, долговечности и ремонтпригодности подъемных асинхронных двигателей и их основных конструктивных узлов.
2. Разработаны математические модели отказов подъемных электродвигателей и их функциональных узлов - обмотки ротора, подшипникового и щеточного узлов, механических элементов и крепежных деталей; установлены законы распределения сроков службы приводных асинхронных двигателей до капитального ремонта, вкладышей подшипников скольжения до восстановительного ремонта, контактных щеток до замены; законы распределения времени восстановления подъемных электродвигателей на рабочем месте и на ремонтных энергозаводах.
3. Установлена вероятностно-статистическая природа параметров функционирования приводных асинхронных двигателей и получены законы распределения коэффициента нагрузки, максимального превышения температуры обмоток статора, длительности технологической паузы и времени движения за подъемный цикл.
4. Получены аналитические зависимости ресурса изоляции обмоток от различных эксплуатационных факторов как при раздельном, так и при комплексном их воздействии, а именно: от температуры окружа-

шей среды, длительности и глубины регулирования скорости, нагрузки подъемных электродвигателей. На основе полученных зависимостей определены рациональные условия эксплуатации приводных асинхронных двигателей с точки зрения обеспечения их планового срока службы.

6. Получена корреляционная зависимость тепловой мощности асинхронных двигателей от старения изоляции и зависимость ресурса изоляции обмоток от увеличения превышения температуры за счет ухудшения теплопроводности изоляции при ее старении.
6. Разработаны рекомендации по повышению надежности асинхронных двигателей шахтных подъемных установок на стадиях конструирования, изготовления и эксплуатации.
7. Разработана методика оценки экономической эффективности повышения надежности приводных электродвигателей шахтных подъемов и определена суточная производительность подъемной установки, при которой экономически целесообразно осуществлять ненагруженное резервирование подъемного электродвигателя.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах автора:

1. Особенности нагрева асинхронных двигателей шахтных подъемных машин в условиях эксплуатации. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции молодых ученых по проблемам угольной промышленности УССР, Донецк, 1968.
2. Влияние температуры окружающего воздуха на работу аппаратуры защиты и асинхронного привода шахтных подъемных установок (соавтор Шатило А.Н.). Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции молодых ученых по проблемам угольной промышленности УССР, Донецк, 1968.
3. О влиянии температуры окружающего воздуха в здании шахтной подъемной машины на нагрев шахтного асинхронного двигателя. Сб. "Электропривод и автоматизация промышленных установок", вып. 7, изд. МВССО УССР, Киев, 1970.
4. Метод проверки тепловых свойств подъемных асинхронных двигателей во время ревизий шахтных подъемных машин (соавтор Калининский И. Д.). Сб. "Электропривод и автоматизация промышленных установок", вып. III, изд. МВССО УССР, Киев, 1970.

5. Повышение надежности асинхронного привода шахтных подъемных установок (соавторы Соколов Е.И., Салыга С.И.). ЦНИИЭУголь, М., 1972.
6. Надежность высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок и пути ее повышения. ЦНИИЭУголь, М., 1972.
7. Вероятностные характеристики эксплуатационной надежности асинхронных высоковольтных двигателей шахтных подъемных установок (соавтор Оленица А.Г.). Сб. трудов института горной механики и техн. кибернетики им.М.М.Федорова, № 27, М., Недра, 1972 (в печати).
8. Количественные параметры надежности и долговечности высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок. Сб. "Повышение надежности и долговечности горных машин". Донецк, изд. ДПИ, 1972 (в печати).
9. Влияние эксплуатационных факторов на надежность высоковольтных асинхронных двигателей шахтных подъемных установок. Сб. "Повышение надежности и долговечности горных машин". Донецк, изд. ДПИ, 1972 (в печати).

Ответственный за выпуск проф., д.г.и. **ЛЫБОВ Р.М.**

Отпечатано на ротапринте изд. отд. ДПИ от 9.Ш.1972г.

Печ. л. I,2, заказ № 019 , тираж 200 экз., БП № 04626
от 9.Ш-72г. Донецк, ул.Артема, 92, (Ш уч.корпус).

Подписано к печати. 6 марта 1972 г.