

УДК 621.313.33

ПОКАЗАТЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АЛМАЗОДОБЫВАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА

В.В. Гусев

Томский политехнический университет
E-mail: vvgus@rambler.ru

Определены количественные характеристики безотказности, характеризующие надежность электрических машин рудничного взрывозащищенного исполнения на стадии эксплуатации в алмазодобывающем комплексе. Установлена взаимосвязь критериев безотказности по отношению к типоразмерам электрических машин. 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 электрических машин.

Ключевые слова:

Эксплуатационная надежность, электрические машины, отказ, статистическая информация, доверительный интервал, средняя наработка до отказа.

Key words:

Maintainability, electrical machine, breakdown, statistical information, confidence interval, mean life to the full.

В основных направлениях экономического и технического развития алмазодобывающей отрасли России (горнорудная корпорация «АЛРОСА») отмечено поддержание высоких темпов развития горных работ и обеспечение эффективности работы основного технологического оборудования, производящего разрушение, транспортирование и переработку горной породы. Эффективность работы в значительной степени определяется надежностью технических средств. Особое влияние на решение этой задачи оказывает эксплуатационная надежность электрических машин переменного тока, являющихся основным элементом электропривода механизмов технологического оборудования. Влияние внешних воздействующих факторов на электрические машины, различные условия их работы и система эксплуатации могут оказывать на общую технологическую систему добычи и переработки алмазодобывающего сырья дестабилизирующее воздействие, т. е. вызывать отклонение от установленных показателей работы оборудования. Поэтому от правильного управления надежностью электрических машин (ЭМ) в технологической группе алмазодобывающего комплекса зависит эффективность работы горнорудной корпорации. Такое положение обуславливает высокие требования, предъявляемые к показателям надежности.

Цель данной работы состоит в определении фактических значений показателей безотказности, характеризующих эксплуатационную надежность электрических машин рудничного взрывозащищенного исполнения на стадии эксплуатации в алмазодобывающем комплексе.

Для подготовки массива исходных данных об отказах ЭМ на предприятиях АК «АЛРОСА» была предварительно изучена и проанализирована эксплуатационная информация и материалы технических отчетов по вибродиагностированию электрооборудования. Кроме этого для получения более достоверных статистических данных об их ра-

боте была разработана специальная учетная форма. Этот документ был официально введен на некоторых объектах АК «АЛРОСА». Наиболее полные статистические данные были получены по рудникам «Интернациональный», «Мир», «Айхал». Это позволило представить фактические модели эксплуатационной надежности по технологическим объектам алмазодобычи.

Обработка массивов статистической информации производилась с помощью разработанного автором программно-вычислительного комплекса «Оценка надежности электрических машин по эксплуатационным данным» [1]. Статистическая точность показателей надежности оценивалась посредством доверительных интервалов с использованием приближенного метода И.А. Рябикина [2] с коэффициентом доверия не ниже 0,9. Для расчета доверительных границ использовались выражения:

$$\bar{T}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} - z_2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{T}^*)^2}{n(n-1)}};$$

$$\bar{T}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} + z_2 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{T}^*)^2}{n(n-1)}},$$

где \bar{T}_1, \bar{T}_2 – нижняя и верхняя граница доверительного интервала; n – число отказов; τ_i – i -е наблюдение случайной величины T ; \bar{T}^* – статистическое среднее случайной величины T ; $z_2 = \Phi_0^{-1}(0,5\delta)$ – значение аргумента, для которого нормированная функция Лапласа равна $0,5\delta$, при $\delta=0,9$ значение $z_2=1,645$.

Модели надежности элементов электротехнического оборудования горнопроходческого комбайна АМ-75

Характер технологических операций, выполняемых горнопроходческим комбайном АМ-75, позволяет рассматривать его работу как состоящую

из нескольких совмещенных во времени функций. Поэтому, с точки зрения информационного анализа, горнопроходческий комбайн рассматривался как совокупность более простых объектов. Надежность выполнения данными структурными предметами заданных функций определяет надежность горнопроходческого комбайна. Исходя из этого, детализировалась работа следующих структурных элементов комбайна:

1. Электродвигатель режущего органа с водяным охлаждением типа d2PRWX250/31-4KL; 200 кВт; 1140 В; 1470 об/мин.
2. Электродвигатель гидравлического привода с воздушным охлаждением типа SP2225L-4; 70 кВт; 1140 В; 1470 об/мин.
3. Электродвигатель привода погрузочного устройства и конвейера с водяным охлаждением типа 2SG4225S-4 (по 2 шт.); 36 кВт; 1140 В; 1450 об/мин.
4. Электродвигатель станции водяных насосов с воздушным охлаждением типа dAM132SX4AX (по 3 шт.); 5;5 кВт; 1140 В; 1475 об/мин.
5. Магнитная станция комбайна, включающая элементы системы автоматики и релейной защиты.

При использовании ретроспективной информации были проанализированы отказы по 12 горнопроходческим комбайнам подземных рудников. Причины потери способности элементов электротехнического оборудования выполнять заданные функции классифицировались следующим образом, рис. 1.

Результаты наблюдений показали, что если рассматривать надежность с позиции эксплуатационных отказов, то для электродвигателей и всех активных механических элементов электропривода горнопроходческих комбайнов характерен случайный резкопеременный циклический режим нагружения, приводящий в результате к поломкам механических элементов из-за интенсивного накопления усталостных повреждений, а также тепловому и вибромеханическому износу изоляции обмоток, выплавлению стержней короткозамкнутого ротора

и другим неисправностям. Отражением эксплуатационных причин явились также действующая система технологической культуры эксплуатации. Из числа ошибок персонала следует отметить следующее:

1. Нередко отключаются датчики дифференциально-температурной защиты, что приводит к эксплуатации электродвигателей при недопустимо высокой нагрузке и чрезмерной частоте пусков. Следствием этого является быстрый вывод обмотки статора из строя. В основу данных случаев положено выполнение производственного плана, несмотря на действительное техническое состояние оборудования.
2. Применяются несовместимые марки консистентных смазок, следовательно, перемешиваясь в подшипнике они, разлагаются, превращаясь в жидкую массу, и тем самым вызывают дефект подшипников.

Конструкционные причины, рис. 2, явились следствием:

- неудачной конструкции соединительной проставки между электродвигателем и редуктором;
- недостаточно эффективной системы водяного охлаждения электродвигателя режущего органа.

Производственно-технологические причины были обусловлены следующими факторами: пакованная электротехническая сталь статора состояла из нецельных штампованных элементов, было отмечено наличие посторонних предметов в электродвигателе, нарушение герметичности охлаждающей рубашки и т. д.

При детальном анализе функционирования элементов электротехнического оборудования горнопроходческого комбайна АМ-75 получены функции зависимости интенсивности отказов λ от времени эксплуатации. На рис. 3 и 4 приведены гистограммы и характеристики отказов по оборудованию АМ-75. Интенсивности отказа электродвигателя режущего органа и электропривода погрузочного устройства и конвейера имеют явно выраженный период приработки первые 1,5 года и нормальной эксплуатации в последующие периоды.

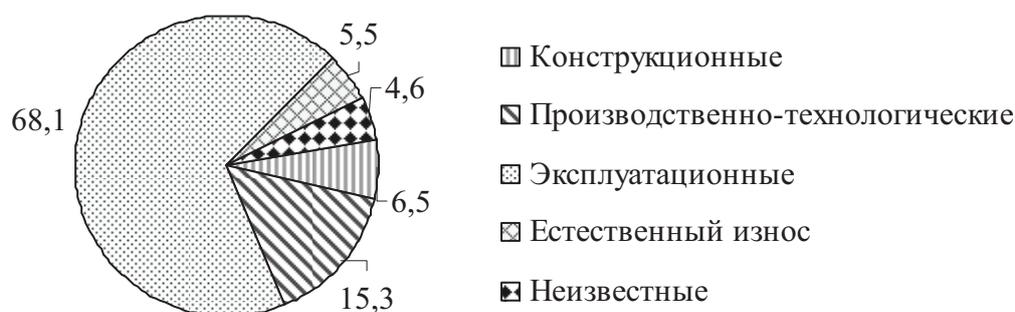


Рис. 1. Процентное соотношение отказов электротехнического оборудования комбайна АМ-75

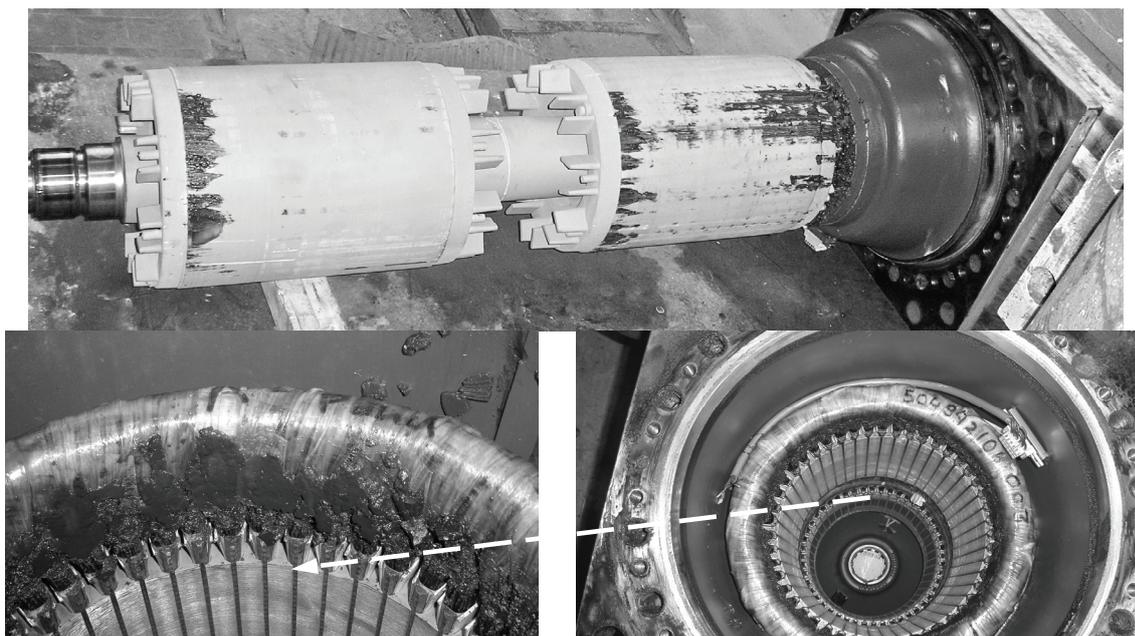


Рис. 2. Попадание смазки на статор и ротор электродвигателя режущего органа горнопроходческого комбайна

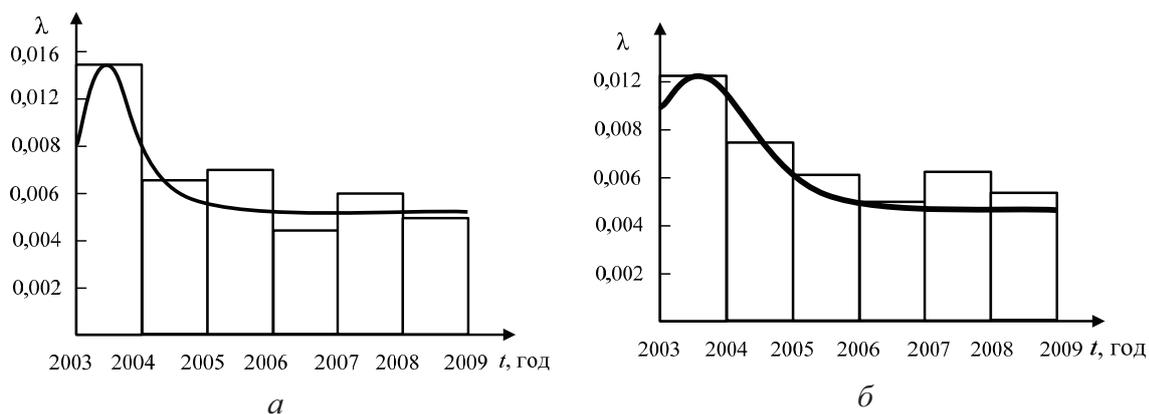


Рис. 3. Гистограмма и характеристики отказов электродвигателя режущего органа (а) и электродвигателя привода погрузочного устройства и конвейера (б)

Это свидетельствует о наличии не выявленных при испытаниях дефектов, связанных с отсутствием на заводе-изготовителе наиболее эффективных методов контроля, что приводит к перерастанию дефектов в отказ.

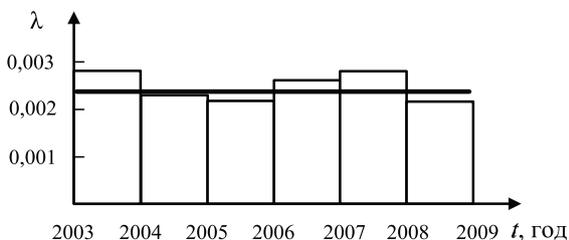


Рис. 4. Гистограмма и характеристика отказов магнитной станции

На основании принятой схемы натурного обследования технического состояния ЭМ на различных участках технологического процесса алмазодо-

бычи, который заключался в рассечении потока отказов, определены показатели эксплуатационной надежности (табл. 1).

Полученные показатели надежности, определенные на срезе эксплуатационной информации по заданным критериям оценки технического состояния, позволяют учитывать вклад каждого элемента электротехнического оборудования в общую вероятность безотказной работы горнопроходческого комбайна АМ-75. Для удобства пользования полученный результат можно представить в виде карты надежности, которая позволяет в дальнейшем корректировать сроки ремонтно-эксплуатационных воздействий.

Анализ результатов табл. 1 показывает, что с учетом установления критерия оценки технического состояния посредством диагностики технического контроля общая наработка по агрегатам немного уменьшается по сравнению с рядом других работ

Таблица 1. Показатели эксплуатационной надежности электротехнического оборудования горнопроходческого комбайна

Элемент оборудования	Вид распределения	Функция плотности распределения $f(t)$	$\bar{T}_1, ч$	$\bar{T}_2, ч$
Электродвигатель режущего органа d2PRWX250/31-4KL	Логарифмически-нормальный	$f(t) = \frac{2,38}{t} e^{-17,30(\ln(t-8,91))^2}$	7720	9483
Электродвигатель гидравлического привода SP2225L-4	Логарифмически-нормальный	$f(t) = \frac{0,98}{t} e^{-3,06(\ln(t-9,51))^2}$	8814	11298
Электродвигатель привода погрузочного устройства 2SG4225S-4	Вейбулла	$f(t) = 0,00017 \left(\frac{t}{1,18}\right)^{0,9} e^{[-(t/1,18)^{0,9}]}$	8085	9356
Электродвигатель станции водяных насосов dAM132SX4AX	Нормальный	$f(t) = 4,3 \cdot 10^{-5} e^{-5,79 \cdot 10^{-9} (t-25067,30)^2}$	23082	27051
Магнитная станция	Нормальный	$f(t) = 1,5 \cdot 10^{-4} e^{-7,43 \cdot 10^{-8} (t-11506,74)^2}$	9248	13764

[3–5]. Но данное понижение не является столь значимым фактором, поскольку важным аргументом является критичность и последствие отказов ответственных механизмов.

В целом результаты анализа показывают полную взаимосвязь показателей надежности ЭМ с условиями эксплуатации в подземных условиях. Для электроприводов горно-шахтного оборудования, работающих в забоях рудников, характерна высокая динамика нагрузки, сформированная сложными стохастическими колебаниями на частотах менее 0,5 Гц и периодическими на частотах 0,5...15 Гц. Периодические колебания вызываются в большинстве случаев режущими органами горношахтного оборудования из-за малых коэффициентов инерции и стохастическими воздействиями, являющимися следствием внешних факторов. Внешние факторы обусловлены в основном неоднородностью разрушаемого массива, воздействием горного давления, изменением скорости подачи исполнительного органа, действием оперативного персонала и др. К этому добавляется неблагоприятное влияние таких факторов, как высокая влажность, запыленность, агрессивность среды.

Модели надежности элементов электротехнического оборудования самоходного вагона 5BC-15M

Подобно предыдущему примеру комплексно анализировалась работа самоходного вагона 5BC-15M, используемого для доставки горной массы. В составе 5BC-15M рассматривались:

1. Электродвигатель хода: АВТ15-4/6/12 (по 2 шт.); 22/46/23 кВт; 660 В.
2. Электродвигатель маслостанции и конвейера: АВК30/15-4/8; 30/15 кВт; 660 В.
3. Кабель: КГЭС 3×16+1×10+1×16.

По эксплуатационным результатам установлено, что большинство отказов связаны с повреждением кабельно-проводниковой продукции 5BC-15M (рис. 5). Представленная информация указывает на то, что основной причиной повреждения кабеля являются механические воздействия, вызванные порывами кабеля, задирами оболочки, повреждениями в местах вулканизированных счалок и снижением сопротивления изоляции. Кроме того, выход из строя кабеля зависит от наличия скрытых технологических дефектов и степени старения (деструкции) элементов кабельной линии в процессе эксплуатации в подземных условиях.



Рис. 5. Процентное соотношение отказов кабельно-проводниковой продукции

Таблица 2. Показатели надежности элементов оборудования 5BC-15M

Элемент оборудования	Вид распределения	Функция надежности $P(t)$	$\bar{T}_1, \text{ч}$	$\bar{T}_2, \text{ч}$
Электродвигатель хода АВТ15-4/6/12	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - 23597,12}{5067,74}\right)$	21928	25268
Электродвигатель маслостанции и конвейера АВК30/15-4/8	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - 20492,51}{3859,18}\right)$	18979	23045
Кабель КГЭС 3×16+1×10+1×16	Вейбулла	$P(t) = \exp\left(-\frac{t}{6,32}\right)^{0,17}$	574	719

Указанные причины приводят к электрическому и физическому старению полимеров. Последнее вызывает перерастание микротрещины в макротрещину, значительное набухание и газонасыщение полимера. В конечном итоге скрытые дефекты приводят к недопустимому уменьшению сопротивления изоляции и электрическому пробое изоляции [6].

Используя статистический материал, был произведен расчет показателей надежности по элементам электротехнического оборудования 5BC-15M (табл. 2).

Модель надежности шахтных вентиляторов местного проветривания подземных рудников

Для оценки технического состояния вероятно статистическим методом шахтных вентиляторов местного проветривания были проанализированы наработки агрегатов со следующими типами электродвигателей:

1. ВМЭ-12А: ВРМ 280S-4У2-5; 110 кВт; 1475 об/мин.
2. ВМЭВО-8А: ВРМ 210S-4У2; 90 кВт; 2950 об/мин.
3. ВМЭВО-6А: АВРМ-160-МА2; 25 кВт; 2950 об/мин.

По статистическим данным произведен расчет показателей эксплуатационной надежности вентиляторов местного проветривания (табл. 3).

Анализ режимов работы вентиляторов показывает, что эффективность их применения и эксплуатационная надежность определяется системой эксплуатации, технологической культурой обслуживания и уровнем износовых отказов, возникающих

в результате старения, усталости, коррозии, эрозии элементов ЭМ. Для подшипниковых узлов ЭМ вентиляторов, работающих в сложных горногеологических условиях подземных выработок рудников с достаточно высоким уровнем запыленности, характерен прогрессирующий абразивный износ рабочих поверхностей подшипников.

Обобщая результаты показателей эксплуатационной надежности ЭМ, эксплуатирующихся в алмазодобывающей отрасли, следует отметить, что разнообразные серии исполнения ЭМ имеют свои слабые звенья и требуют особого подхода при разработке модели надежности. Приведенные показатели эксплуатационной надежности имеют широкий разброс значений по различным технологическим объектам алмазодобычи. Однако они дают объективное представление о состоянии ЭМ рудничного взрывозащищенного исполнения. Различия в значениях показателей объясняется уровнем климатических условий, режимами работы, уровнем квалификации персонала и рядом других причин.

По итогам исследований получены фактические количественные характеристики свойств, определяющих эксплуатационную надежность электрических машин рудничного взрывозащищенного исполнения и элементов электротехнического горно-шахтного оборудования. Достоверность оценки показателей надежности установлена по апостериорной информации диагностического обследования и разнородной априорной статистической информации. С учетом условий эксплуатации ЭМ определены границы характеристики на-

Таблица 3. Показатели надежности шахтных вентиляторов местного проветривания

Элемент оборудования	Вид распределения	Функция надежности $P(t)$	$\bar{T}_1, \text{ч}$	$\bar{T}_2, \text{ч}$
ВМЭ-12А	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - 22418,36}{5943,87}\right)$	20714	24122
ВМЭВО-8А	Нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{t - 14974,51}{4117,36}\right)$	12420	16191
ВМЭВО-6А0	Логарифмически-нормальный	$P(t) = 0,5 - \Phi\left(\frac{\ln t - 11,38}{1,19}\right)$	10249	13159

дежности. Полученные результаты по эксплуатационной надежности в дальнейшем могут быть использованы для постановки и решения ряда задач, например, проведение сравнительных технико-

экономических расчетов, определение оптимальной периодичности замен отдельных элементов деталей, узлов, а также при проектировании и изготовлении ЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.В., Шевчук В.П. Программа оценки надежности электрических машин по эксплуатационным данным. Авторское свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2009614199. Роспатент. Москва, 12.08. 2009.
2. Рябинин И.А., Киреев Ю.Н. Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. – Л.: Судостроение, 1974. – 264 с.
3. Надежность электрооборудования угольных шахт / Б.Н. Ванев, В.М. Гостишев, В.С. Дзюбан и др.; Под ред. А.И. Пархоменко. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1997. – 302 с.
4. Разгильдеев Г.И., Серов В.И. Безопасность и надежность взрывозащищенного электрооборудования. – М.: Недра, 1992. – 207 с.
5. Быков А.И., Ванев Б.Н., Главный В.Д. и др. Надежность взрывозащищенного и рудничного электрооборудования. – М.: Недра, 1979. – 302 с.
6. Вайда Д. Исследования повреждений изоляции / пер. с венг. под ред. Д.В. Разевига, М.: Энергия, 1968. – 400 с.

Поступила 15.03.2010 г.

УДК 621.313.333

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

П.В. Тютеева, О.О. Муравлева

Томский политехнический университет
E-mail: TyutevaPV@elti.tpu.ru

Предложен способ модернизации асинхронных двигателей при изменении геометрии машины, позволяющий спроектировать энергоэффективный асинхронный двигатель с наивысшим КПД IЕЗ согласно спецификации СЕМЕР. Возрастание цены асинхронного двигателя компенсируется уменьшением расходов, приходящихся на срок эксплуатации, а также увеличением срока службы и надежности.

Ключевые слова:

Асинхронные двигатели, энергоэффективность, модернизация, экономическая оценка.

Key words:

Induction motors, energy efficiency, modernization, economic evaluation.

Введение

Современные мировые темпы развития электромашиностроения ставят задачу дальнейшего повышения энергетических показателей общепромышленных электродвигателей. Анализ работ по разработке и изготовлению асинхронных двигателей (АД) различных типов в развитых странах показывает, что наиболее актуальным направлением в последние годы было создание АД с повышенным на 2...3 % КПД по сравнению со стандартными двигателями, что обосновано тем, что увеличение при этом стоимости АД быстро окупается за счет снижения эксплуатационных затрат из-за меньшего потребления электроэнергии [1]. Такие серии двигателей уже начали выпускать фирмы Brook Hansen, ABB, Siemens и многие другие предприятия по всему миру, в нашей стране выпуском подобных машин занимается концерн РУСЭЛПРОМ.

Использование энергосберегающих АД дает большой эффект в виде экономии электроэнергии, а также, что очень важно, позволяет существенно улучшить экологическое состояние страны. Направления развития электрических машин обусловлены следующими процессами: ростом цен на энергоносители, истощением мировых запасов жидких углеводородов. Это обуславливает, с одной стороны, ужесточение энергетических требований к промышленному оборудованию, а, с другой стороны, поиск энергосберегающих технологий. Разработка энергоэффективных электрических машин позволит частично решить проблему энергосбережения.

Целью данной работы является модернизация и совершенствование проектирования энергоэффективных асинхронных двигателей при изменении геометрии и их экономическая оценка.