

УДК 621.313.3

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.В. Гусев

Томский политехнический университет

E-mail: vvgus@rambler.ru

*Представлена методология, позволяющая оценить эксплуатационную надежность электрических машин с точки зрения системного анализа. Рассмотрена неопределенность информационных данных, возникающих при эксплуатации электрических машин. Произведена декомпозиция цели для эффективной эксплуатации и обслуживания электрических машин, которая отражена в виде «дерева цели». Полученные результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для постановки и решения ряда задач управления эксплуатационной надежностью электрических машин.*

### **Ключевые слова:**

*Системный анализ, система, эксплуатационная надежность, неопределенность информации, эффективная эксплуатация и обслуживание электрических машин, критерии, дерево цели.*

Наиболее важной и актуальной проблемой современного производства является повышение качества и надежности механизмов машин и оборудования в любой отрасли промышленности. Под надежностью электрических машин (ЭМ) понимают ее способность безотказно работать с неизменными характеристиками в течение заданного промежутка времени и при определенных условиях применения [1]. Для обеспечения надежности необходим ряд мероприятий, позволяющих более эффективно продлить срок службы ЭМ. Данная задача характеризуется многими переплетающимися отношениями и для ее решения необходимо осуществление системного анализа (СА) [2–5] по оценке надежности ЭМ.

Рассмотрим данную проблему на примере горно-обогатительного комплекса в алмазодобывающей отрасли и определим исходные позиции и критерии, являющиеся принципиальным подходом к оценке надежности электрических машин. Для решения производственных задач возможен поиск оптимального варианта режима функционирования ЭМ, т. е. нахождение максимума или минимума целевой функции  $F(x)$  (например, максимума энергосбережения, минимума затрат при выполнении ремонтных работ, максимума надежности и т. п.):

$$F(x) \rightarrow \max, x \in G, \quad (*)$$

где  $x$  — элемент некоторого нормируемого пространства  $G$ , определяемого природой модели,  $G \in E$ , где  $E$  — множество, которое может иметь любой сложности природу, определяемую структурой модели и особенностями исследуемой системы.

Таким образом, основной реальной проблемой ситуацией является обеспечение надежности ЭМ при эксплуатации. Однако, данная формулировка проблемы является лишь исходным пунктом для СА. Первопричина этого в том, что проблемосодержащая система не является ни изолированной, ни монолитной [4]. Она связана с другими системами, входит как часть в некоторую надсистему и одновременно сама состоит из частей, подси-

стем, в различной степени причастных к данной проблеме.

В соответствии с методологией СА необходимо выделить элементы и сформулировать конкретные целевые требования к подсистемам (функциональные, технические, экономические, организационные), которые оказывают ключевое влияние на надежность ЭМ.

Данная работа основывается на системе эффективной эксплуатации и обслуживания (ЭЭиО) ЭМ, в рамках которой обеспечивается контроль работоспособности и диагностика отказов, назначение времени проведения проверок исправности функционирования, проведение профилактического обслуживания, выбор оптимального числа запасных изделий. Любое оборудование в процессе работы изнашивается, устаревает и, соответственно, нуждается в организации контроля над исправностью его функционирования, а также в проведении ремонтных, восстановительных работ. Под техническим обслуживанием систем понимается совокупность мероприятий, которые служат для поддержания и восстановления рабочих свойств систем. Данные мероприятия включают:

- текущее обслуживание;
- контроль работоспособности и диагностику отказов;
- ремонтно-восстановительные работы.

На производстве при эксплуатации ЭМ об их состоянии можно узнать только с помощью контроля. Контрольные проверки являются неотъемлемой частью мероприятий по поддержанию и восстановлению работоспособности. Поскольку отказ системы приводит к экономическим потерям, а контроль также сопряжен с затратами, то возникает задача оптимального планирования проверок с точки зрения общих затрат. Таким образом, следует определить сроки проведения контрольных проверок по обнаружению неисправностей, при которых суммарные затраты на проведение контроля и потери от простоя оборудования из-за не-

своевременного обнаружения и замены вышедших из строя элементов минимизируются.

Ремонтно-восстановительные мероприятия – более масштабные по своему содержанию работы. Они связаны с проведением комплексной проверки работоспособности ЭМ, заменой отказавших или достигших установленного ресурса элементов, регулировкой отдельных параметров и прочими работами. При планировании профилактических и восстановительных мероприятий так же, как и при планировании контрольных проверок, необходимо учитывать, что несвоевременное проведение профилактических работ может привести к отказам ЭМ и, как следствие, к материальным потерям. Необоснованно частое проведение профилактических работ снижает эффективность функционирования роторного оборудования, что в свою очередь сопряжено с определенными материальными издержками. Следовательно, в данном случае также имеет место оптимизационная задача: определить сроки проведения профилактических работ и замены оборудования, при которых суммарные ожидаемые затраты по ремонту и замене, а также потери, связанные с ухудшением технологических характеристик работы оборудования ввиду его старения, минимизируются на всем интервале эксплуатации системы.

Кроме этого, существует еще одна задача, относящаяся к организации обслуживания ЭМ – расчет и обеспечение запасными частями или элементами. Очень важно определить необходимое количество запасных частей и элементов ЭМ для того, чтобы быть уверенным в том, что система с вероятностью  $P(t)$  будет бесперебойно функционировать в течение определенного времени.

Перечисленные мероприятия составляют последовательность этапов, реализация которых позволяет осуществить ЭЭиО ЭМ.

Таким образом, обобщенными элементами системы для производственного горнодобывающего комплекса являются следующие подсистемы:

- эксплуатация;
- ремонт;
- техническая диагностика;
- эксплуатационная надежность.

Основными функциями эксплуатационной надежности в системе ЭЭиО ЭМ являются организация и ведение наблюдения за эксплуатационными параметрами ЭМ и ее элементов, обработка информации с целью определения параметров модели, формирование модели, решение оптимизационных задач, принятие решений и внедрение их в практику управления эксплуатацией ЭМ.

К системе организации эксплуатации и обслуживания ЭМ необходимо применять вероятностные модели [1], так как в качестве управляющего параметра в данных задачах используется наработка объектов до отказа, а это, как известно, величина

случайная. Поэтому при построении моделей такого типа необходимо проводить значительную работу по сбору информации об эксплуатации ЭМ, о наработках до отказа, времени восстановления их работоспособности, стратегиях обслуживания и т. д.

Для принятия оптимальных решений, позволяющих успешно управлять системой ЭЭиО ЭМ как в технологической группе, так и в общей системе добычи и переработки алмазосодобного сырья, необходима информация, характеризующая сам процесс эксплуатации (например, о показателях надежности – безотказности, долговечности, ремонтнопригодности и др.). Отсутствие информации не позволяет использовать результаты теоретических наработок для рациональной организации процесса эксплуатации. Наиболее полную информацию для проведения расчетов, выполняемых с максимальным отражением условий эксплуатаций, можно получить посредством сбора данных об отказах и разрушениях деталей.

Существующая система сбора и обработки эксплуатационных данных для текущего анализа надежности ЭМ в алмазодобывающей отрасли лишь частично удовлетворяет требованиям диагностического контроля. Это объясняется тем, что слабо налажена аварийная статистика (статистика по отказам) по ЭМ, затруднено получение информации по дефектам, не приведших к отказу и выявленных при плановых ремонтах, не фиксируется время их ремонта, время нахождения на складе и время установки. Кроме этого, по субъективным и объективным причинам нередко случаи, когда отказ оборудования нигде не фиксируется.

При исследовании систем и дальнейшем принятии решений по формализации проблемы имеет место неопределенность информации, соответственно, принятие решений осуществляется в интервале неопределенности – риск – определенность при постепенном снижении уровня неопределенности. Под уровнем неопределенности понимается показатель, характеризующий оставшуюся неопределенность после того, как вся существующая информация будет принята во внимание. Таким образом, уровень неопределенности выражается вероятностью, приписываемой исходам события, и имеет место тогда, когда нужно произвести выбор из совокупности возможных исходов. Формально уровень неопределенности случайного объекта  $A$  с конечным множеством возможных состояний  $A_1, \dots, A_n$  с соответствующими вероятностями  $p_1, p_2, \dots, p_n$  определится как [2, 3]:

$$H(A) = H(\{p_i\}) = - \sum_{k=1}^n p_k \log p_k,$$

который называют энтропией случайного объекта  $A$  (или распределения  $\{p_i\}$ ). Для простого события, которое оценивается двумя несовместимыми событиями  $p, q=1-p$  в случае равенства исходов  $p=q=1/2$ ,  $H(A)$  приобретает максимальное значение. При выборе экстремального по энтропии ра-

спределения гарантируется наибольшая неопределенность, т. е. доминирует вариант с наихудшим случаем при данных условиях.

В СА неопределенность принятия решений обусловлена неполным знанием информации о параметрах, показателях, внешних воздействиях и ограничениях. Существуют различные виды неопределенности:

- неопределенность, вызванная большим временем упреждения в прогнозе технического состояния;
- неопределенность, порожденная недостаточным знанием информации в силу технических, экономических и социальных причин;
- неопределенность из-за субъективности принятия решения или отсутствия опыта, знаний;
- неопределенность, связанная с ограничениями в ситуации принятия решения;
- неопределенность, вызванная поведением внешней среды и др.

В условиях эксплуатации статистические данные по ЭМ, как правило, неполные, а обрабатываемые данные в силу объективных и субъективных причин имеют высокую степень неопределенности. Эксплуатационная информация о надежности ЭМ представляет результат пассивного (неуправляемого) эксперимента. С точки зрения математической статистики, результатом подконтрольной эксплуатации является неоднородная информация. Неоднородность в данном случае заключается в том [6], что получаемая информация состоит частично из наработок до отказов и частично — из наработок до приостановки наблюдений без отказа электродвигателей. При этом наработка до приостановки наблюдения, как и наработка до отказа, является случайной величиной ввиду того, что в эксплуатационных условиях практически всегда в подконтрольные группы исследования машин попадают ЭМ различного времени выпуска с подверженной случайным изменениям интенсивностью использования. В таких случаях определение характеристик надежности объектов приходится осуществлять на основе специфических выборок. Этот способ носит название метод цензурированных выборок (ЦВ). С точки зрения корректного определения характеристик надежности ЭМ при данной неопределенности необходимо учитывать следующие факторы, приводящие к возникновению ЦВ:

- разное время начала и окончания эксплуатации ЭМ;
- снятие с испытаний или с эксплуатации некоторых ЭМ по организационным причинам или из-за отказов составных частей изделий;
- перевод ЭМ из одного режима работы в другой в процессе эксплуатации;
- необходимость оценки надежности до наступления отказов всех испытываемых ЭМ (эта ситуация имеет место в системах оперативного управления качеством и надежностью механизмов);

- периодический контроль ЭМ, приводящий к поступлению информации о надежности в виде интервалов наблюдений (группирование информации).

Возникающие определенные информационные потери при эксплуатации как раз и учитываются «неклассическим» методом обработки (метод ЦВ).

Дальнейшим этапом процесса оценки надежности ЭМ является формализация описания системы, т. е. построение ее модели. Наиболее простой формой описания системы является представление ее в виде «черного ящика». Однако, вопросы, касающиеся внутреннего устройства системы, невозможно решить только с помощью модели «черного ящика». Для этого необходимы более развитые, более детальные модели. В этих случаях систему представляют в виде структуры путем деления на подсистемы, компоненты, элементы с взаимосвязями, которые могут носить различный характер [2, 4]. Структуризация цели, функций и задач при исследовании действующих промышленных предприятий позволяет учесть все возможные факторы и выделить из них наиболее эффективные и значимые.

Выбор наилучшего решения по ЭЭиО ЭМ предполагает, прежде всего, количественное определение цели. Для этого следует осуществить структуризацию (декомпозицию) цели ЭМ до уровня конкретных показателей (критериев). Декомпозиция цели по эффективной эксплуатации ЭМ может быть представлена в виде «дерева цели» (рисунок). Здесь выделены уровни подсистем: ремонт, эксплуатация, техническая диагностика, эксплуатационная надежность. Далее детализация осуществляется по каждой подсистеме, в которой указываются наиболее вероятные критерии, влияющие на эксплуатационную эффективность ЭМ:

**А.1. Подсистема ремонта:**  $f_1$  — уровень качества ремонта;  $f_2$  — заводской дефект;  $f_3$  — неправильный выбор материалов при ремонте;  $f_4$  — неудачное конструктивное решение и несовершенство технологии ремонта;  $f_5$  — качество входного и выходного контроля ЭМ;  $f_6$  — уровень квалификации ремонтного персонала;  $f_7$  — нарушение правил гигиены труда;  $f_8$  — неправильный инструктаж ремонтного персонала.

**А.2. Подсистема эксплуатации:**  $f_9$  — уровень квалификации эксплуатационного персонала;  $f_{10}$  — неправильный инструктаж эксплуатационного персонала;  $f_{11}$  — нарушение правил гигиены труда;  $f_{12}$  — условия хранения и транспортирования;  $f_{13}$  — условия эксплуатации и работы;  $f_{14}$  — применение соответствующего типа электрических защит;  $f_{15}$  — неправильный выбор двигателя;  $f_{16}$  — обеспечение проверок срабатывания и возврата защиты в исходное состояние;  $f_{17}$  — отсутствие заземленности корпусов ЭМ;  $f_{18}$  — необеспечение электрических и механических блокировок;  $f_{19}$  — необеспечение взрывозащищенности;  $f_{20}$  — достаточность качества организации работ по разработке и внедрению мероприятий, направленных на устранение дефекта;  $f_{21}$  — качество электроэнергии;  $f_{22}$  — качество поста-

вляемых деталей, сборочных единиц и комплектующих изделий;  $f_{23}$  – доля работающего оборудования;  $f_{24}$  – время наработки оборудования;  $f_{25}$  – коэффициент загрузки оборудования;  $f_{26}$  – коэффициент сменности оборудования.

**А.3.** Подсистема диагностики:  $f_{27}$  – уровень и полнота сбора диагностической информации;  $f_{28}$  – контролепригодность оборудования;  $f_{29}$  – уровень квалификации специалиста по диагностике;  $f_{30}$  – качество диагностики исправного состояния, правильного функционирования, работоспособного состояния;  $f_{31}$  – досрочные выводы в ремонт вследствие ложных диагнозов;  $f_{32}$  – качество прогнозирования технического состояния и ресурса;  $f_{33}$  – допуск к дальнейшей эксплуатации некоторой части ненадежного оборудования;  $f_{34}$  – необходимость принятия компромиссных решений при установлении границ (норм) в условиях недостаточно четкой и полной оценки альтернативных факторов и их последствий;  $f_{35}$  – критерий экономической неэффективности диагностики (при малом парке эксплуатируемых машин);  $f_{36}$  – проведение сложных и трудоемких исследований для разработки методик и средств диагностирования конкретных машин по конкретному виду дефекта при неполном представлении о его причинах и условиях возникновения, а также факторах, влияющих на его развитие;  $f_{37}$  – недостаточность информационного базиса при постановке задач диагностики и подготовке диагностических заключений;  $f_{38}$  – техниче-

ская невозможность проведения диагностирования в объеме, дающем полную информацию.

**А.4.** Подсистема эксплуатационной надежности:  $f_{39}$  – состав и количество дополнительных варьируемых величин и показателей, связанных с надежностью;  $f_{40}$  – ошибки при расчете оценки надежности;  $f_{41}$  – нормирование показателей надежности и определение экономического эффекта;  $f_{42}$  – критерии оценки функциональных последствий отказа: вынужденный простой; необходимость затрат на проведение ремонта; вынужденный простой и необходимость затрат на проведение ремонта.

Безусловно, выделенная система критериев не является полной и отражающей все потребности при качественной и эффективной эксплуатации ЭМ, но она позволяет показать структуру цели. Основной особенностью выделенной системы критериев  $\{f_{i}\}_{42}$  является их противоречивость и взаимосвязанность. Так, выбор метода диагностики в конкретном случае определяется не столько конструкцией машины, которую нужно обследовать, сколько, главным образом, зависит от величины затрат, которые может позволить себе владелец оборудования, и глубины анализа результатов. Экономия трудовых ресурсов, увеличение потока информации при диагностировании возможно вследствие автоматизации производственных процессов, т. е. внедрение автоматизированных систем контроля и диагностики, что в свою очередь требует дополнительных расходов на реализацию данного проекта.

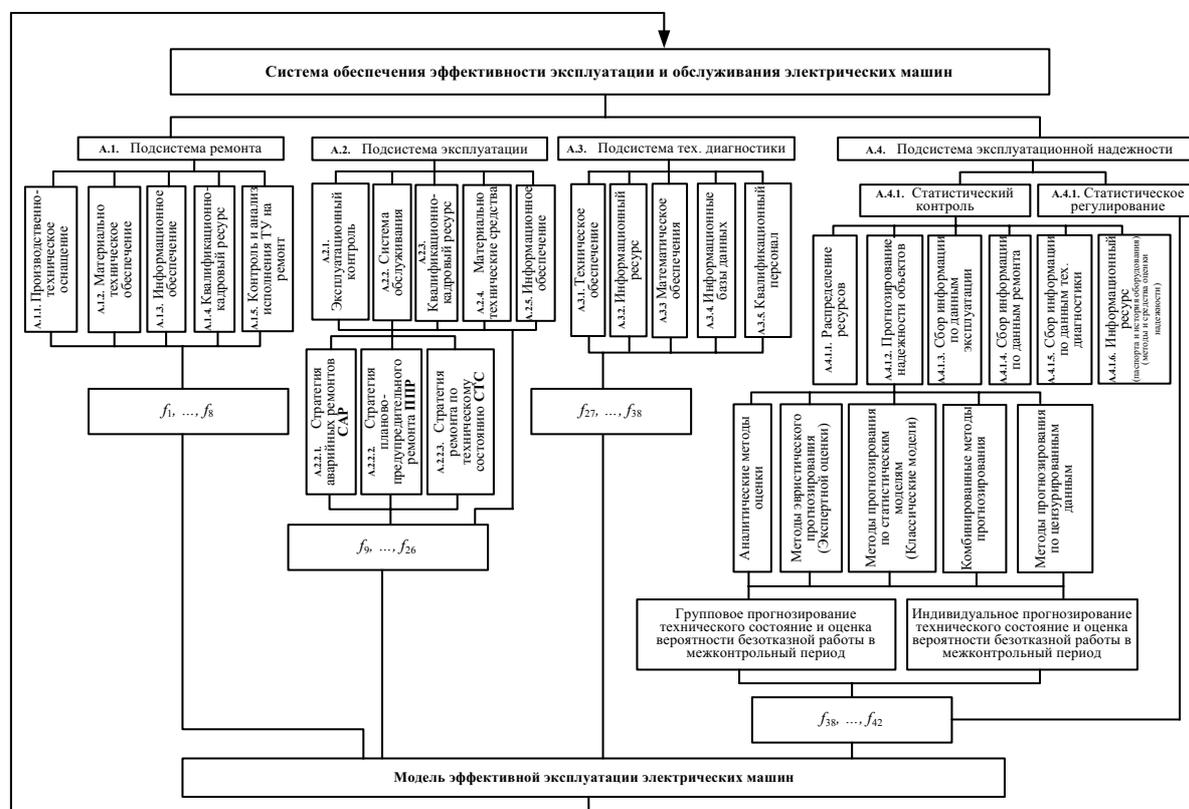


Рисунок. Дерево цели по эффективной эксплуатации и обслуживанию ЭМ

В аварийных ситуациях определяющим фактором при диагностике ЭМ является скорость постановки диагноза и принятия решения, и при этих обстоятельствах возникают новые критерии, влияющие на оценку надежности (вероятность восстановления; гамма-процентное время восстановления; интенсивность восстановления; средняя трудоемкость восстановления).

Включение в структурную схему подсистемы надежности А.4 обеспечивает координацию действий элементов подсистем (ремонта А.1, эксплуатации А.2, технической диагностики А.3) в ходе их функционирования и включает учет, анализ, прогнозирование, регулирование, организацию и нормирование. Выбор метода прогнозирования по оценке надежности обосновывается точностью и достоверностью полученных данных, требованиями точности и достоверности прогноза. По используемым статистическим данным парка эксплуатируемых машин и результатам диагностирования проводят коррекцию критериев оценки состояний и их диагностических признаков, т. е. реализуют обратную связь на основе диагностирования парка машин. Оценка технического состояния ЭМ после ремонта и результаты статистического анализа причин возникновения отказов не только выявляют недобросовестных ремонтников, но и совершенствуют мастерство добросовестных.

Таким образом, решение по эффективной эксплуатации должно всегда приниматься на основе выбора, который может быть критериальным (как в рассмотренном случае), волевым (осознанным) и случайным (интуитивным).

Дальнейшую детализацию можно осуществлять по отдельным технологическим операциям или разделению парка машин по степени их надежности и выделению группы критического (с точки зрения обеспечения технологического режима предприятия) оборудования. Для производственных функций горнорудного производства выделяют следующие операции: добыча, транспортировка, переработка, обогащение. Добыча осуществляется с применением подземного горнопроходческого и наземного оборудования, работающего в карьерах и на драгах. Транспортировка осуществляется с помощью горной погрузо-доставочной техники, конвейеров, подъемных установок, самосвалов. Технологический процесс переработки и обогащения полезных ископаемых представляет

собой цепочку, в которой задействованы агрегаты: мельницы, дробилки, насосы, вентиляторы и др. Проведение систематизации по отдельным технологическим операциям позволяет устанавливать параметрическую оценку надежности для данного оборудования с отысканием целевой функции  $F(x)$  в (\*), уменьшением размерности вектора  $x$  и со снижением сложности структуры множества  $G$ .

В заключение необходимо отметить, что использование методологии СА позволило представить эксплуатационную надежность ЭМ как управляемый информационный процесс последовательного снятия неопределенности в целенаправленном поиске оптимального пути обеспечения ЭЭиО ЭМ. Формирование цели СА основывается на комплексном подходе каждой проблемы, которая состоит не только в разнообразии стратегий развития системы в будущем, но и в уникальности каждой из них. В рамках такой методологии, рассматривающей в полном единстве систему ЭЭиО ЭМ, может быть обеспечена надежность ЭМ на этапе эксплуатации.

На основе СА проведена структуризация цели по обеспечению надежности ЭМ при исследовании действующих промышленных предприятий алмазодобывающей отрасли, которая может быть представлена в виде «дерева цели», позволяющая учесть все возможные факторы и выделить из них наиболее важные критерии, которые оказывают влияние на эффективность эксплуатации ЭМ. Данная работа позволяет обосновать следующие предложения:

- снижение числа внеплановых остановок (внезапных отказов) оборудования при достижении максимально длительного срока службы дорогостоящего оборудования;
- постоянное наличие (предоставление) информации о состоянии оборудования, позволяющее судить о состоянии общей производительности, а также прогнозирование и планирование потребности в необходимом обслуживании;
- обеспечение равномерной прогнозируемой и обоснованной загрузки ремонтного персонала, совместное планирование графиков и объемов обслуживания ремонтными и технологическими службами;
- снижение эксплуатационных затрат предприятия, увеличение прибыли, повышение безопасности труда, качества продукции и сокращение отходов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Животкевич И.Н., Смирнов А.П. Надежность технических изделий. – М.: Олита, 2003. – 472 с.
2. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2006. – 454 с.
3. Варжапетян А.Г., Глушенко В.В., Глушенко П.В. Системность процессов создания и диагностики технических структур. – СПб.: Политехника, 2004. – 186 с.
4. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Основы системного анализа. – Томск: Изд-во «НТЛ», 2001. – 396 с.
5. Спицнадель В.Н. Основы системного анализа. – СПб.: Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 326 с.
6. Муравлев О.П., Шевчук В.П., Гусев В.В. Информационное обеспечение для оценки надежности электрических машин // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Матер. Всеросс. научно-техн. конф. – 12–14 мая 2008 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – С. 166–168.

Поступила 30.06.2008 г.