

05.13.06
X24

На правах рукописи



Хасанов Алексей Романович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТАРЕЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2007

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Автоматика и управление» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Казаринов Лев Сергеевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Ширяев Владимир Иванович;
кандидат технических наук,
доцент Евдокимов Сергей Алексеевич.

Ведущее предприятие – филиал «УралВТИ – Челябинэлектросетьпроект»
ОАО «Инженерный центр энергетики Урала»,
г. Челябинск

Защита состоится « 16 » мая 2007г. на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080; г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд.1001/главный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан « 11 » апреля 2007г.

Ученый секретарь диссертационного совета



А.М. Коровин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИТИКА РАБОТЫ



Актуальность работы

Оценка текущего состояния оборудования в составе сложных технологических комплексов (ТК) и прогноз его состояния в рамках АСУ ТП является в настоящее время одной из приоритетных задач при построении автоматизированных систем. Имеющийся опыт показывает, что проблема оценки остаточного ресурса стареющего оборудования является комплексной, включающей технической, технологической, управленческой, экономической и организационный аспекты, а также требует разработки методов и алгоритмов автоматизации процессов мониторинга и прогнозирования технического состояния контролируемого оборудования в реальном времени.

Сложность решения данной задачи состоит в том, что для реальных ТК число контролируемых параметров оборудования, влияющих на возникновение и развитие аварийных ситуаций, весьма велико, и организовать оперативный контроль всех необходимых параметров, как правило, невозможно. Поэтому для оценки текущего состояния оборудования в составе сложных ТК целесообразно использовать обобщенные оценки остаточного ресурса, которые позволяют прогнозировать возникновение аварийных ситуаций до уровня отдельных агрегатов (а не узлов агрегата) ТК и являются относительно доступными для расчета и контроля по данным текущей эксплуатации и технических обследований оборудования.

На сегодняшний день существует множество методов контроля и диагностики технического состояния оборудования. Эти методы, в основном, направлены на выявление наиболее проблемных узлов контролируемого агрегата с целью предупреждения или устранения аварийных ситуаций на данном оборудовании. Такой подход для отдельных агрегатов, безусловно, является оправданным, т.к. позволяет одновременно решать задачу диагностики состояния оборудования и предупреждать возникновение аварий на основе целенаправленных профилактических ремонтов, что, в свою очередь, повышает надежность и безопасность эксплуатации этого оборудования.

Существенный вклад в развитие работ по надежности, устойчивости, живучести и безопасности энергетического оборудования внесли Дьяков А.Ф., Воропай Н.И., Савельев В.А., Таджикибаев А.И., Тевяшев А.Д., Чукреев Ю.Я., Канцедалов В.Г., Берлявский Г.П., Злепко В.Ф., Пампуро В.И., Болотин В.В., Ушаков И.А., Данюшевский И.А., Барков А.В., Карандаев А.С., Резинский В.Ф., Цапко Г.П. и др.

Однако, на практике, зачастую не представляется возможным производить диагностику всего имеющегося парка контролируемого оборудования одновременно. Более того, некоторые методы диагностики требуют вывода оборудования из эксплуатации. В связи с этим, актуальной является задача автоматизированного мониторинга текущего обобщенного технического состояния оборудования в составе сложного ТК в реальном времени, с целью выявления отдельных агрегатов, требующих проведение более детальных обследований и, при необходимости, проведение профилактических

Южно-уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА

работ. Здесь знание обобщенного технического состояния оборудования позволяет оценить надежность всего ТК в целом и правильно распределить ресурсы на проведение ремонтно-профилактических работ по видам оборудования.

Поэтому задача разработки методов и алгоритмов автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования по текущему состоянию с использованием обобщенных показателей является актуальной. Данная задача в настоящее время решена не полностью и является предметом исследований в данной работе.

Целью диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям работоспособности, а также разработка подхода к приоритетному планированию ремонтно-профилактических работ по текущему состоянию оборудования.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи исследовательского, методического и прикладного характера:

1) разработка методики мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям на основе данных текущей эксплуатации в реальном времени;

2) разработка алгоритма оперативного распознавания предаварийных ситуаций контролируемого оборудования на основе оценок его текущего состояния;

3) разработка подхода к приоритетному планированию ремонтно-профилактических работ на основе текущих и прогнозных оценок остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям;

4) разработка специализированной программы для ЭВМ «Автоматизированная информационная система «Ресурс» (АИС «Ресурс»), предназначенной для решения задач мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования, а также ведения информационной базы данных по энергооборудованию электрических станций и сетей;

5) внедрение разработанного программного обеспечения в практику контроля технического состояния энергетического оборудования металлургического производства в рамках задачи оперативного планирования ремонтно-профилактических работ на ОАО «ММК», г. Магнитогорск.

Объектом исследования работы является стареющее энергетическое оборудование электрических станций, рассматриваемое с точки зрения оценки и прогнозирования его остаточного ресурса по текущему состоянию.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы и модели оценки и прогнозирования остаточного ресурса оборудования в рамках автоматизированных систем управления планирования ремонтно-профилактических работ.

Методика исследования

Основу методики исследования в диссертационной работе составляют методы математического и статистического анализа, методы обработки информации в АСУ, методы оптимизации, методы математического программирования,

теоретические и методологические основы построения АСУ ТП, имитационного моделирования с применением инструментальных средств автоматизации математических и инженерных вычислений.

Проверка изложенных в работе методов проводилась с использованием компьютерного моделирования и экспериментально.

Научная новизна

1. Предложена методика оперативной оценки (мониторинга) и прогнозирования остаточного ресурса контролируемого оборудования на основе обобщенных показателей, представляющих собой агрегированные показатели текущего технического состояния оборудования.

2. Предложен алгоритм оперативного распознавания предаварийной ситуации на контролируемом оборудовании.

Практическая ценность

1. Предложенная методика оперативной оценки остаточного ресурса позволяет производить мониторинг и прогнозирование технического состояния контролируемого оборудования в реальном времени, что, в свою очередь, способствует повышению безопасности и экономичности (с точки зрения ремонтно-профилактических мероприятий) эксплуатации оборудования.

2. Разработанный алгоритм оперативного распознавания предаварийных ситуаций на контролируемом оборудовании позволяет предупреждать возможные отказы и непредвиденные аварийные ситуации, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации данного оборудования.

3. Предложенный подход приоритетного планирования ремонтно-профилактических работ позволяет осуществлять обоснованное планирование ремонтно-профилактических работ и снабжение запасными частями по текущему состоянию контролируемого оборудования, повышая тем самым эффективность использования дефицитного ремонтного фонда предприятия.

4. Созданная программа для ЭВМ АИС «Ресурс» позволяет производить оценку и мониторинг остаточного ресурса оборудования в реальном времени, а также осуществлять прогноз его технического состояния. Кроме того, основываясь на текущем или прогнозном значении остаточного ресурса, программа АИС «Ресурс» позволяет судить о степени необходимости проведения ремонтно-профилактических работ, а также установить численную очередность их проведения при рассмотрении парка оборудования.

Реализация работы

Разработанное методическое и программное обеспечение АИС «Ресурс» прошло апробацию и внедрено на ЦЭС ОАО ММК в составе АСУ ТП турбогенератора ст.№8 и используется для мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса агрегата в реальном времени, что подтверждено соответствующим актом.

Удельный экономический эффект при прогнозировании одной аварийной ситуации на турбогенераторе ст.№8 ЦЭС ОАО «ММК» мощностью 40МВт составляет 0.5 млн. руб. за сутки внепланового простоя.

Апробация работы

Основные результаты исследования, изложенные в диссертации, докладывались на научно-практической конференции XXVI Российской школы по проблемам науки и технологий, г. Миасс, 27-28 июня 2006 г.; на Всероссийской научно-практической Интернет-конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии», 15-30 октября 2006 г.; на X Всероссийском научно-практическом семинаре «Информатизация и системы управления в органах исполнительной власти», г. Челябинск, 18-19 октября 2006г.

Результаты работы также нашли отражение в отчете по научно-исследовательской работе: Государственный контракт № 02.442.11.7322 по теме: шифр 2006-РИ-19.0/001/330 «Проведение научных исследований молодыми учеными» (IV очередь), НИР «Разработка методического обеспечения прогнозирования остаточного ресурса стареющего энергетического оборудования на основе интеллектуального анализа данных», выполняемые в рамках федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002-2006 гг.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 2 работы в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика оперативной оценки остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям на основе статистических и текущих данных эксплуатации.

2. Алгоритм оперативного распознавания предаварийных ситуаций контролируемого оборудования на основе оценок его текущего состояния.

3. Подход к приоритетному планированию ремонтно-профилактических работ на основе текущих и прогнозных оценок остаточного ресурса контролируемого оборудования.

4. Специализированная программа для ЭВМ ведения информационной базы данных по энергооборудованию электрических станций и сетей «Автоматизированная информационная система «Ресурс» (АИС «Ресурс»), предназначенная для решения задачи мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования, а также для осуществления поддержки в задачах оперативного планирования ремонтно-профилактических работ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Постановка базовых задач исследования

Характерной особенностью эксплуатации энергетического оборудования электрических станций многих промышленных предприятий Российской Федерации является то, что по многим позициям оборудования сроки эксплуатации значительно превышают парк ресурс. Поэтому подобное оборудование необходимо относить к классу стареющего оборудования. Для

такого оборудования обычные подходы к оценке ресурса и планированию ремонтных работ для интервала эксплуатации в пределах паркового ресурса являются неэффективными и требуют существенной доработки.

Практически все стареющее оборудование эксплуатируется на своей заключительной стадии – стадии предразрушения. На данной стадии механизм повреждаемости и, как следствие, механизм истощаемости рабочего ресурса основных элементов энергооборудования сильно отличаются от стадии эксплуатации в пределах паркового ресурса. Все больше начинает преобладать спонтанность, чем строгая закономерность. Все чаще наблюдаются пороговые изменения как свойств материала, так и временных показателей развития опасных дефектов. На рис. 1 показана схема вероятности отказов энергооборудования ТЭС в различные периоды его эксплуатации.

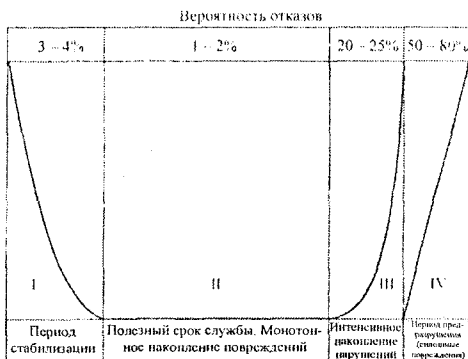


Рис. 1. Схема вероятности отказов энергооборудования ТЭС в различные периоды эксплуатации

Оценка надёжности сложного технического объекта основывается на том, что все происходящие на контролируемом оборудовании технологические нарушения и связанные с ними отказы рассматриваются во времени, как поток событий. Эксплуатация сложного энергооборудования характеризуется потоком неисправностей и отказов, для устранения которых проводятся ремонтно-профилактические работы. Различают текущие и капитальные ремонты. В соответствии с этим потоки событий можно разделить на два потока: поток неисправностей и поток полных отказов.

При нормальной эксплуатации поток полных отказов сведен к минимуму за счет профилактических работ и капитальных ремонтов. Поэтому статистика эксплуатации отражает в основном поток неисправностей, который в дальнейшем и будем рассматривать.

Поток неисправностей характеризуется следующими интегральными показателями: параметром потока $\lambda_H(t)$ (для однородного потока –

интенсивность событий) и временем между событиями $\tau_H(t)$ (обратная величина $\lambda_H(t)$).

Потоки неисправностей и отказов отражают внешнюю сторону эксплуатации. Внутренняя сторона характеризуется глубинными процессами, связанными со снижением ресурса оборудования в процессе эксплуатации, в частности, параметрических ресурсов, которые отражают запас изменения параметров объекта контроля до критической границы:

$$r_i(t) = \frac{\left| \Pi_{дон}^{ав} - \Pi_i(t) \right|}{\left| \Pi_{дон}^{ав} - \Pi_{ном} \right|}, \quad (1)$$

где Π_i – текущее значение i -ого параметрического показателя работоспособности; $\Pi_{дон}^{ав}$ – предельное (аварийное) значение Π_i , $\Pi_{ном}$ – номинальное (рабочее) значение Π_i ; r_i – частный параметрический ресурс контролируемого агрегата по Π_i .

Общее состояние объекта контроля характеризуется также режимными факторами, учитывающими условия и режимы эксплуатации технического объекта, превышение установленных значений которых ухудшает состояние объекта. Действие режимных факторов носит, как правило, интегральный характер, поэтому нормируются их интегральные величины:

$$\rho_j(t) = 1 - b \int_{t_k}^t \varphi_j(\tau) d\tau, \quad (2)$$

$$\varphi_j = \begin{cases} \left| P_{дон}^{\pm} - P_j \right|, & P_j \notin \left[P_{дон}^-, P_{дон}^+ \right]; \\ 0, & P_j \in \left[P_{дон}^-, P_{дон}^+ \right], \end{cases} \quad (3)$$

где P_j – j -ый режимный показатель работоспособности; ρ_j – частный режимный ресурс контролируемого агрегата по показателю P_j ; φ_j – функция отклонения P_j от диапазона допустимых значений $\left[P_{дон}^-, P_{дон}^+ \right]$; b – нормирующий коэффициент; $[t_k, t]$ – интервал времени с момента окончания k -го рассматриваемого ремонта до текущего момента времени.

Таким образом, объект контроля характеризуется набором частных ресурсов (см. рис. 2), число которых для сложных технических объектов может быть велико:

$$\{R_i(t); i \in I_R\}, \quad (4)$$

где $R_i(t)$ – частный ресурс агрегата по i -му показателю работоспособности; I_R – индексное множество частных ресурсов.

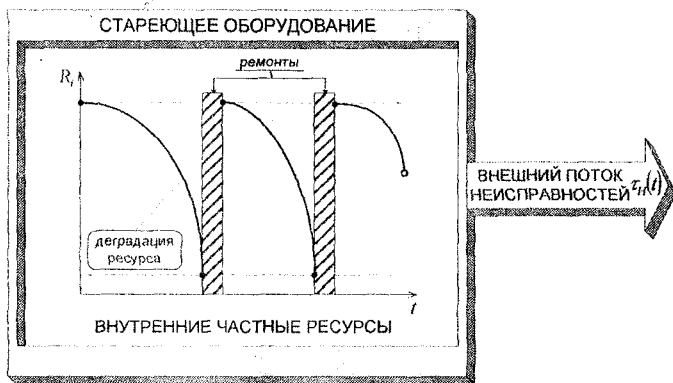


Рис. 2. Графическое представление рассматриваемого оборудования: $\{R_i\}$ – множество частных ресурсов; $\tau_H(t)$ – время между событиями внешнего потока текущих неисправностей

Типовым подходом к оценке обобщенного ресурса агрегата в настоящее время является выявление «узких» мест, т.е. выявление таких показателей работоспособности, по которым частный ресурс контролируемого агрегата является минимальным. Аналитически данный подход можно записать в следующем виде:

$$R_{\min}(t) = \min_{(i \in I_R)} \{R_i(t)\}, \quad (5)$$

где $R_{\min}(t)$ – оценка критического ресурса агрегата; R_i – все рассматриваемые частные ресурсы без градации на параметрические и режимные показатели.

Преимуществом данного подхода является возможность оценки полного отказа оборудования, а также его диагностические свойства, т.е. всегда можно локализовать «наихудший» показатель работоспособности.

Однако наряду с задачей оценки внутреннего технического состояния агрегата существует задача внешней оценки его технического состояния, необходимой для рассмотрения надежности всего технологического комплекса в целом, элементом которого является данный агрегат. Типовым подходом обобщенной внешней оценки агрегата является оценка параметра потока неисправностей λ_H и связанной с ним оценкой времени между событиями этого потока τ_H . В общем случае параметры λ_H и τ_H являются случайными величинами, имеющими нестационарный характер.

Ставятся две основные задачи:

- 1) задача оперативного распознавания предаварийной ситуации;
- 2) оценка текущего остаточного ресурса стареющего оборудования.

Рассмотрим постановку задачи оперативного распознавания предаварийной ситуации на контролируемом оборудовании.

Необходимо найти решающую функцию:

$$R_o(\{R_i\}, t) \leq R_d : \mu(t), \quad (6)$$

где R_o – обобщенный параметрический ресурс оборудования; R_d – значение предаварийной границы для обобщенного параметрического ресурса; $\mu(t)$ – индикаторная функция.

Решающая функция (6) описывает два основных состояния контролируемого оборудования:

а) если неравенство (6) выполнено, то для контролируемого оборудования прогнозируется аварийная ситуация на ближайшем интервале времени Δt_p ;

б) невыполнение неравенства (6) свидетельствует о том, что аварийная ситуация для контролируемого оборудования в ближайшее время не прогнозируется.

Возможны следующие ошибки решения неравенства (6):

1) решающей функцией прогнозируется нормальная работа оборудования, а в действительности произошел отказ – ситуация пропуска аварийной ситуации $\mu_{пп}(t)=1$;

2) решающей функцией прогнозируется аварийная ситуация на оборудовании, а в действительности отказа не было – ситуация возникновения ложной тревоги $\mu_{лт}(t)=1$.

Запишем относительные частоты возникновения указанных ошибок решения:

$$P_{пп}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \mu_{пп,s}(t), \quad (7)$$

$$P_{лт}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \mu_{лт,s}(t), \quad (8)$$

где N – общее число рассматриваемых отказов.

В данной работе предлагается обобщенный параметрический ресурс оборудования рассчитывать по формуле:

$$R_o(t) = \prod_{i=1}^n R_i^{\alpha_i}(t), \quad (9)$$

$$\alpha_i \geq 0, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad i = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где α_i – удельные весовые коэффициенты частных параметрических ресурсов в составе обобщенного; n – общее число рассматриваемых частных ресурсов.

Из определения обобщенного ресурса (9) и накладываемых ограничений (10) видно, что он отражает аварийные ситуации для сложного агрегата, т.к. если по какому-либо частному параметрическому показателю возникла аварийная ситуация ($R_i(t) = 0$), то $R_o(t)$ также покажет аварийную ситуацию ($R_o(t) = 0$). И наоборот, если все параметрические частные показатели находятся в области своих рабочих значений ($R_i(t) = 1, i = \overline{1, n}$), то и обобщенный ресурс покажет нормальное рабочее состояние оборудования в целом ($R_o(t) = 1$). При этом, если один из весовых коэффициентов частных ресурсов равен 1 ($\alpha_i = 1$), то

обобщенный ресурс будет равен значению соответствующего частного ресурса. Следовательно, данная оценка может быть использована в решении задачи оперативного распознавания предаварийных ситуаций на контролируемом оборудовании.

В итоге, ставится задача найти оптимальные значения α_i и R_d с точки зрения минимума пропусков аварийных ситуаций и возникновения ложных тревог. Формализованная постановка задачи:

$$\min_{\{\alpha_i\}, R_d} (P_{\text{пр}} + P_{\text{лт}}). \quad (11)$$

Далее рассмотрим постановку задачи оценки текущего параметрического остаточного ресурса стареющего оборудования.

Для оценки текущего остаточного ресурса оборудования, выраженного в единицах времени, необходимо найти функциональную зависимость

$$\tau_H(t) = a_0 R_d(\{R_i\}, t), \quad (12)$$

где τ_H – оценка времени между отказами рассматриваемого потока; a_0 – масштабный коэффициент ($a_0 > 0$).

Для оценки остаточного ресурса в относительных единицах (0...1 или 0...100%) предлагается производить расчеты по следующей формуле:

$$R_{\text{ост}}(t) = \frac{\tau_H(t) - t}{\tau_H(t)}, \quad (13)$$

где $R_{\text{ост}}$ – остаточный ресурс оборудования; t – текущее время с момента окончания последнего текущего ремонта.

Функциональную зависимость (12) предлагается определять по следующей формуле:

$$\tau_H(t) = t + \Delta\tau(t) : \nu(t), \quad (14)$$

$$\Delta\tau(t) = a_0 \prod_{i=1}^n R_i^{\sigma_i}(t). \quad (15)$$

$$\sigma_i \geq 0, \sum_{i=1}^n \sigma_i = 1, i = \overline{1, n}, \quad (16)$$

где $\Delta\tau$ – выработка интервала времени между отказами τ_H ; σ_i – удельные весовые коэффициенты рассматриваемых частных ресурсов оборудования в составе $\Delta\tau$; a_0 – масштабный коэффициент; $\nu(t)$ – индикаторная функция ошибок.

В этом случае возможны ошибки, аналогичные рассмотренным ранее, а именно:

1) $\nu_{\text{пр}}(t) = 1$ – пропуск аварийной ситуации, т.е. $\tau_H(t)$ свидетельствует о том, что в ближайшее время на оборудовании отказов не предвидится, а фактически отказ был;

2) $v_{ЛТ}(t) = 1$ – возникновение ложной тревоги, т.е. $\tau_H(t)$ свидетельствует о том, что на оборудовании в ближайшее время ожидается отказ, которого в действительности нет.

Относительные частоты возникновения указанных ошибок запишем по аналогии с формулами (7) и (8):

$$P_{ПР}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N v_{ПР,s}(t), \quad (17)$$

$$P_{ЛТ}(t) = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N v_{ЛТ,s}(t), \quad (18)$$

где N – общее число рассматриваемых отказов.

В итоге ставится задача найти оптимальные значения σ_i и α_0 с точки зрения минимума пропусков аварийных ситуаций и возникновения ложных тревог. Формализация поставленной задачи:

$$\min_{\{\sigma_i, \alpha_0\}} (P_{ПР} + P_{ЛТ}). \quad (19)$$

Методика оперативной оценки остаточного ресурса контролируемого оборудования

Задача оперативного распознавания предаварийной ситуации.

Принятие решений о предаварийном/аварийном состоянии по контролируемым частным ресурсам агрегата осуществляется согласно решающему правилу (6).

Для оперирования линейными выражениями производятся следующие преобразования:

$$\ln \left(\prod_{i=1}^n R_i^{\alpha_i}(t) \right) \leq \ln(R_d), \quad (20)$$

$$\ln(R_i) = x_i, \quad (21)$$

$$-\ln(R_d) = \alpha_0, \quad (22)$$

$$\frac{\alpha_i}{\alpha_0} = a_i. \quad (23)$$

С учетом (20) – (23) и (9) перепишем (6) в виде:

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i + 1 \leq 0. \quad (24)$$

При такой постановке задачи всю статистическую информацию можно представить в виде следующей системы линейных неравенств:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n a_i x_{is} + 1 \leq 0, & s \in I_u; \\ \sum_{i=1}^n a_i x_{is} + 1 > 0, & s \in I_p, \end{cases} \quad (25)$$

где x_{is} – статистическое значение i -го параметрического частного ресурса для s -го события из потока τ_H ($s = \overline{1, N}$, N – общее число событий в потоке); I_a, I_p – индексные множества предаварийных ситуаций и ситуаций нормальной работы соответственно.

Ставится задача, найти такие значения коэффициентов a_i ($i = \overline{1, n}$), при которых подсистема неравенств (25) была бы максимально совместной. Минимизируемая целевая функция имеет следующий вид:

$$E_{CO}^2 = (1-\gamma)E_p^2 + \gamma E_a^2 = \frac{1}{N} \left[(1-\gamma) \sum_{s \in I_p} \left(\left(\sum_{i=1}^n b_i^2 x_{is} + 1 \right)^- \right)^2 + \gamma \sum_{s \in I_a} \left(\left(\sum_{i=1}^n b_i^2 x_{is} + 1 \right)^+ \right)^2 \right], \quad (26)$$

где $a_i = b_i^2$ – искомые коэффициенты; s – индекс статистических данных; знаки “+” и “-” указывают, что рассматриваются соответственно только положительные и отрицательные значения выражения, приведенного в скобках:

$$(f)^+ = \begin{cases} f, & f > 0 \\ 0, & f \leq 0 \end{cases}, \quad (f)^- = \begin{cases} f, & f < 0 \\ 0, & q \geq 0 \end{cases} \text{ – диодная характеристика.}$$

Для решения поставленной задачи оптимизации рассматривались несколько известных методов: метод простого покоординатного спуска (ППС), метод градиентного поиска (ГП), метод поиска глобального экстремума с использованием генетических алгоритмов (ГА). При решении относительно простых (унимодальных) задач использовались методы ППС и ГП, которые дают практически идентичные результаты (при всех прочих одинаковых условиях). Однако методу ППС для функций с большим числом искомых параметров (координат) требуется в несколько раз больше времени для проведения расчетов, чем методу ГП. Для сложного энергетического оборудования подобные оптимизационные задачи являются, как правило, многопараметрическими и неунимодальными. В связи с этим, в работе был использован подход к оценке индивидуальных весовых коэффициентов при помощи ГА, позволяющих находить глобальный экстремум.

В результате минимизации полученной функции (26) методом ГА находятся такие значения параметра b_i , при которых риски пропуска аварийной ситуации и возникновения ложной тревоги минимальны. Далее для нахождения индивидуальных коэффициентов влияния α_i и текущего значения предаварийной границы R_d необходимо произвести обратные (20) – (23) преобразования.

На практике возможна ситуация, когда объем имеющейся статистической информации является недостаточным для решения указанной выше оптимизационной задачи. В этом случае, весовые коэффициенты α_i невозможно определить из условия минимума ошибок принятия решения, и они используются лишь в роли весовых коэффициентов, с помощью которых осуществляется свертка частных показателей ресурсов агрегата в один обобщенный показатель ресурса контролируемого агрегата в целом. Подобная свертка осуществляется экспертной оценкой – оценкой влияния частных показателей ресурса на общее

состояния оборудования. Для этого каждый из коллектива N_3 экспертов \mathcal{E}_j оценивает каждый из рассматриваемых частных ресурсов R_i в баллах β_{ij} (например, от 0 до 10) с точки зрения значимости данного ресурса в общем состоянии агрегата. Формируется таблица экспертных оценок:

Экспертные оценки частных ресурсов

Эксперт Ресурс	\mathcal{E}_1	\mathcal{E}_2	...	\mathcal{E}_{N_3}
R_1	β_{11}	β_{12}	...	β_{1N_3}
R_2	β_{21}	β_{22}	...	β_{2N_3}
...
R_n	β_{n1}	β_{n2}	...	β_{nN_3}

После этого для каждого из частных ресурсов R_i производится нормировка бальных оценок с учетом ограничений (10) по формуле:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_3} \beta_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_3} \beta_{ij}}. \quad (27)$$

Затем решается та же оптимизационная задача (11), но уже относительно одного неизвестного параметра R_i . Следует отметить, что при полном отсутствии статистики потока текущих неисправностей (например, контролируемый агрегат только вышел из очередного капитального ремонта), значение предаварийной границы обобщенного параметрического ресурса приравнивается нулю $R_i = 0$.

Далее, на основании найденных и нормированных весовых коэффициентов α_i , рассчитывается обобщенный параметрический ресурс R_0 по формуле (9).

Оценка текущего параметрического остаточного ресурса (мониторинг).

Для расчета неизвестных коэффициентов a_0 и σ_i используется следующее решающее правило:

$$\Delta\tau_p(t) = \Delta\tau_\phi(t), \quad (28)$$

где $\Delta\tau_p(t)$, $\Delta\tau_\phi(t)$ – расчетное и фактическое значение выработки τ_H соответственно.

Рассматриваемая оптимизационная задача, как и большинство прикладных задач, решается с заданной точностью, определяемой дискретностью интервала времени локализации аварийной ситуации. Применительно к рассматриваемой задаче точность или, другими словами, доверительный интервал полученного решения будет выражен соответственно в единицах времени (например, в сутках). Под пропуском аварийной ситуации понимается такое расчетное значение τ_H , которое превышает фактическое значение с учетом заданной точности.

Соответственно под возникновением ложной тревоги понимается такое расчетное значение τ_H , которое меньше фактического значения с учетом заданной точности. При этом точность или допустимый интервал пропуска аварийной ситуации и возникновения ложной тревоги в общем случае могут быть различные. Аналитическая запись описанных двух случаев представлена в виде следующей системы:

$$\begin{cases} a_0 \prod_{i=1}^n R_i^{\sigma_i}(t) \geq \Delta \tau_{\Phi} - d_{\text{ПР}}; \\ a_0 \prod_{i=1}^n R_i^{\sigma_i}(t) \leq \Delta \tau_{\Phi} - d_{\text{ЛТ}}, \end{cases} \quad (29)$$

где $d_{\text{ПР}}$, $d_{\text{ЛТ}}$ – заданная точность пропуска аварийной ситуации и возникновения ложной тревоги соответственно.

Сформулируем задачу оптимизации. Для оперирования линейными выражениями проведем следующие преобразования неравенств системы (29):

$$D_{\text{ЛТ}} = -\ln(\Delta \tau_{\Phi} - d_{\text{ЛТ}}); D_{\text{ПР}} = -\ln(\Delta \tau_{\Phi} + d_{\text{ПР}}); \sigma_0 = \ln(a_0); x_i = \ln(R_i). \quad (30)$$

С учетом преобразований (30) перепишем систему неравенств (29) в следующем линейном виде:

$$\begin{cases} \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i x_i + D_{\text{ЛТ}} \geq 0; \\ \sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i x_i + D_{\text{ПР}} \leq 0. \end{cases} \quad (31)$$

Запишем минимизируемую функцию:

$$E_{\tau}^2 = \frac{1}{N} \left[(1-\beta) \sum_s \left(\left(\sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i x_{is} + D_{\text{ЛТ}s} \right)^- \right)^2 + \beta \sum_s \left(\left(\sigma_0 + \sum_{i=1}^n \sigma_i x_{is} + D_{\text{ПР}s} \right)^+ \right)^2 \right]. \quad (32)$$

Для учета ограничений (16) введем в функцию (32) следующие величины:

$$W = \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i - 1 \right)^2, \quad \omega_i^2 = \sigma_i. \quad (33)$$

В итоге получим следующую целевую функцию:

$$\begin{aligned} E_{\tau}^2 = \frac{1}{N} & \left[(1-\beta) \sum_s \left(\left(\sigma_0 + \sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_{is} + D_{\text{ЛТ}s} \right)^- \right)^2 + \right. \\ & \left. + \beta \sum_s \left(\left(\sigma_0 + \sum_{i=1}^n \omega_i^2 x_{is} + D_{\text{ПР}s} \right)^+ \right)^2 \right] + \eta \left(\sum_{i=1}^n \omega_i^2 - 1 \right)^2, \end{aligned} \quad (34)$$

где η – коэффициент штрафной функции W .

В результате минимизации функции (34) и с учетом преобразований (30), (33) находятся такие удельные весовые коэффициенты σ_i и масштабный коэффициент

α_0 , которые, минимизируя риски пропуска аварийной ситуации и возникновения ложной тревоги, однозначно определяют выражения (15) и (14) для расчета τ_H .

После определения решения уравнения (14) для расчета времени между событиями в рассматриваемом потоке неисправностей, оценка величины остаточного ресурса контролируемого оборудования производится по формуле (13).

Как уже отмечалось ранее число контролируемых показателей для сложного энергоагрегата велико, поэтому при решении конкретных практических задач не всегда представляется возможным учесть влияние каждого из рассматриваемых параметров на величину τ_H в отдельности. Поэтому, в работе предлагается дополнительно вводить некоторые агрегированные показатели, включающие в себя различные частные показатели. При этом целесообразно, чтобы число нормируемых показателей надёжности было минимально, они имели простой физический смысл, допускали возможность получения расчетной оценки на этапе проектирования и получения статистической оценки по результатам испытаний или данным эксплуатации. В общем случае, количество обобщенных показателей может быть различно. Основными ограничениями при выборе числа обобщенных показателей являются, во-первых, объем имеющейся статистики; во-вторых, физический смысл группировки частных показателей. Процедура агрегирования можно представить в виде древовидной структуры, представленной на рис. 3.

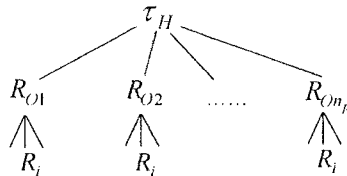


Рис. 3. Процедура агрегирования: $n_p \leq (N - 1)$ – число обобщенных показателей; N – число рассматриваемых статистических событий

В данной работе в качестве агрегированных показателей предлагается использовать следующие:

1. Обобщенный диагностический ресурс $r_o(t)$ – свертка из всех рассматриваемых частных диагностических ресурсов:

$$r_o(t) = \prod_{i=1}^n r_i^{a_i}(t), \quad (35)$$

где r_i – частный параметрический ресурс контролируемого агрегата по P_i ; n – общее число r_i ; a_i – индивидуальные коэффициенты влияния частных параметрических ресурсов в составе обобщенного.

2. Обобщенный режимный ресурс $\rho_o(t)$ – свертка из всех рассматриваемых режимных показателей работоспособности:

$$\rho_O(t) = \prod_{j=1}^m \rho_j^{\beta_j}(t), \quad (36)$$

где ρ_j – частный режимный ресурс контролируемого агрегата по показателю P_j ; m – общее число рассматриваемых режимных показателей; β_j – индивидуальные коэффициенты влияния частных режимных ресурсов в составе обобщенного. В этом случае выражение (15) примет следующий вид:

$$\Delta\tau(t) = a_0 \prod_{i=1}^2 R_{O_i}^{\sigma_i} = a_0 r_O^{\sigma_1}(t) \rho_O^{\sigma_2}(t), \quad (37)$$

$$R_{O_1}(t) = r_O(t), \quad R_{O_2}(t) = \rho_O(t).$$

Далее решается задача (19). Следует отметить, что в случае недостатка выделенных степеней свободы (в данном случае 3 степени свободы) для решения поставленной задачи с требуемой точностью, можно увеличить число агрегированных показателей $R_{O_i}(t)$ при условии достаточного объема статистики для решения оптимизационной задачи (19).

Описанная методика мониторинга остаточного ресурса стареющего оборудования лежит в основе разработанной программы для ЭВМ АИС «Ресурс».

Прогнозирование значений остаточного ресурса оборудования с расчетом достоверности прогнозных значений

При решении практических задач помимо мониторинга текущего состояния технического объекта, необходимо формировать прогнозную оценку его состояния на определенный интервал времени. В данной работе прогнозирование остаточного и обобщенного параметрического ресурсов технического объекта производится на основе экстраполяции соответственно зависимостей (9) и (13), рассчитанных для текущего момента, на заданный временной интервал (рис. 4).

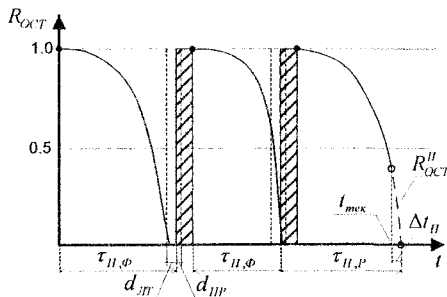


Рис. 4. Остаточный ресурс контролируемого оборудования: $\tau_{Н,Ф}$, $\tau_{Н,Р}$ – фактическое (статистическое) и расчетное (прогнозное) значения τ_H соответственно; $d_{ПР}$, $d_{ПТ}$ – заданная точность пропуска аварийной ситуации и возникновения ложной тревоги соответственно; $R_{ОСТ}^{ПР}$ – прогнозное на текущий

момент значение остаточного ресурса оборудования; Δt_{II} – прогнозное на текущий момент время ожидания наступления очередного события.

Основываясь на текущих или прогнозных значениях обобщенного параметрического и остаточного ресурсов, можно выделить три основных состояния контролируемого агрегата: рабочее, предаварийное и аварийное. Рабочим является состояние агрегата, при котором $R_{\min}(t_k) > 0$, $R_{OCT}(t_k) > 0$ и $R_O(t_k) > 0$; предаварийным – при котором $R_{\min}(t_k) > 0$, $R_{OCT}(t_k) > 0$ и $R_O(t_k) = 0$; аварийное состояние – отказ агрегата, при котором $R_{\min}(t_k) = 0$, $R_{OCT}(t_k) = 0$ и $R_O(t_k) = 0$.

При решении практических задач прогноза, важным аспектом является достоверность полученных прогнозных значений, расчет которой осуществляется по известным законам теории вероятности и математической статистики. В работе было принято, что оцениваемые величины (прогнозируемые значения остаточного и обобщенного параметрического ресурсов объекта контроля) распределены согласно гамма-функции, которая является наиболее общим случаем распределения случайных величин. Плотность гамма-распределения рассчитывается по формуле:

$$f(R_{OCT}, a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} R_{OCT}^{a-1} \exp\left(-\frac{R_{OCT}}{b}\right), \quad (38)$$
$$a = \frac{M^2}{D}, \quad b = \frac{D}{M},$$

где a, b – параметр формы и масштаба соответственно; M, D – математическое ожидание и дисперсия оценки остаточного ресурса соответственно.

Описанный способ прогнозирования остаточного ресурса и оценка достоверности прогнозных значений использовались при разработке АИС «Ресурс».

Алгоритм оперативного распознания предаварийных/аварийных ситуаций на контролируемом оборудовании

Основываясь на текущих оценках остаточного и обобщенного параметрического ресурсов контролируемого оборудования, решается задача оперативного распознания предаварийных/аварийных ситуаций на объекте контроля. Алгоритм решения данной задачи следующий:

1°. Измерение и накопление данных по текущим показателям работоспособности агрегата.

2°. Используя предложенную методику оперативной оценки остаточного ресурса оборудования, оценить текущие значения остаточного (13) и обобщенного параметрического (9) ресурсов контролируемого агрегата.

3°. Оценить значение критического ресурса агрегата по формуле (5).

4°. Сопоставить полученные текущие значения ресурсов с пороговым уровнем – нулем:

4.1) выполнение условий $R_{\min}(t_k) > 0$, $R_{OCT}(t_k) > 0$ и $R_O(t_k) > 0$ свидетельствует о нормальном рабочем состоянии контролируемого агрегата;

4.2) выполнение условий $R_{\min}(t_k) > 0$, $R_{OCT}(t_k) > 0$ и $R_O(t_k) = 0$ свидетельствует о предаварийном состоянии контролируемого агрегата; выносится решение о необходимости проведения профилактических работ; при этом необходимо рассчитать вероятность возникновения аварийной ситуации по формуле (38), основываясь на статистике предшествующей эксплуатации;

4.3) выполнение условий $R_{\min}(t_k) = 0$, $R_{OCT}(t_k) = 0$ и $R_O(t_k) = 0$ свидетельствует об аварийном состоянии контролируемого агрегата; выносится решение о выводе агрегата из эксплуатации и необходимости проведения срочных ремонтных работ.

Предложенный алгоритм оперативного распознавания предаварийных/аварийных ситуаций на контролируемом оборудовании по его текущему состоянию позволяет предупреждать возможные отказы и непредвиденные аварийные ситуации, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации данного оборудования.

Алгоритм реализован в АИС «Ресурс».

Подход к приоритетному планированию ремонтно-профилактических работ

Полученные в результате решения поставленной задачи объективные значения текущего или прогнозного состояния оборудования способствуют решению задачи оперативного планирования ремонтных работ, путем расстановки ремонтных приоритетов, которые позволяют установить численную очередность проведения ремонтно-профилактических работ, а анализ критического и остаточного ресурсов – необходимость их проведения на момент принятия решения при дефиците материальных ресурсов. Расстановку ремонтных приоритетов предлагается производить, исходя из выработки остаточного ресурса контролируемого однотипного оборудования:

$$L_k(t) = (1 - R_{OCT}^k(t)) \cdot 100\%, \quad (39)$$

где L_k – выработка остаточного ресурса k -го оборудования; R_{OCT}^k – остаточный ресурс k -го оборудования на момент принятия решения.

Расстановку ремонтных приоритетов $P_k(t)$ можно провести путем ранжирования полученных значений $L_k(t)$ контролируемого парка однотипного оборудования в порядке убывания и присвоения каждому из агрегатов соответствующего номера (1, 2, ...).

При рассмотрении прогнозных значений обобщенных ресурсов контролируемого оборудования на заданный отрезок времени, механизм расстановки ремонтных приоритетов аналогичен, но при принятии решения необходимо также учитывать и достоверность полученного прогноза.

Таким образом, предложенный метод оценки остаточного ресурса может быть использован в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических

работ для различного оборудования промышленных предприятий энергетической инфраструктуры. Расстановка приоритетов позволяет установить численную очередность проведения ремонтно-профилактических работ, а анализ критического и остаточного ресурсов – необходимость их проведения на момент принятия решения при дефиците материальных ресурсов.

Предложенный подход используется в АИС «Ресурс» при назначении ремонтных приоритетов контролируемого оборудования.

Автоматизированная информационная система «Ресурс»

С целью автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса контролируемого оборудования была разработана программа для ЭВМ «Автоматизированная информационная система «Ресурс», в основе которой лежат полученные научные результаты. АИС «Ресурс» предназначена для автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования, а также для ведения информационной базы данных по энергетическому оборудованию.

АИС «Ресурс» обеспечивает выполнение следующих функций:

- оценка и графическое отображение критического и остаточного ресурсов оборудования;
- прогнозирование остаточного ресурса оборудования на заданный интервал времени;
- расчет и графическое отображение вероятностных оценок возникновения аварийных ситуаций на контролируемом оборудовании;
- расчет и графическое отображение ремонтных приоритетов оборудования;
- ведение информационной базы данных показателей работоспособности и ремонтной статистики оборудования.

Пример главного окна приложения анализа и прогноза ресурсов агрегатов приведен на рис. 5. Пример главного окна модуля расстановки ремонтных приоритетов приведен на рис. 6.

Автоматизированная информационная система «Ресурс» состоит из 7 основных модулей: информационной базы данных, модуля автоматизированного ввода данных, модуля расчета обобщенного, частного и критического ресурсов, программного обеспечения (ПО) операторов производственно-технических отделов (ПТО), ПО технических экспертов и ПО администрирования.

В информационной базе данных хранятся сведения о структуре станций, информация об основных эксплуатационных характеристиках агрегатов, параметрах расчета обобщенного и критического ресурса.

Поддержка ведения базы данных в АИС «Ресурс» реализуется посредством системы управления базами данных (СУБД) Interbase.

Модуль автоматизированного ввода данных позволяет вводить текущие значения контролируемых показателей работоспособности в электронную базу данных из существующей АСУ ТП в автоматическом режиме. При отсутствии на контролируемом оборудовании АСУ ТП данный модуль позволяет оператору осуществлять ручной ввод в базу данных значений показателей эксплуатации.

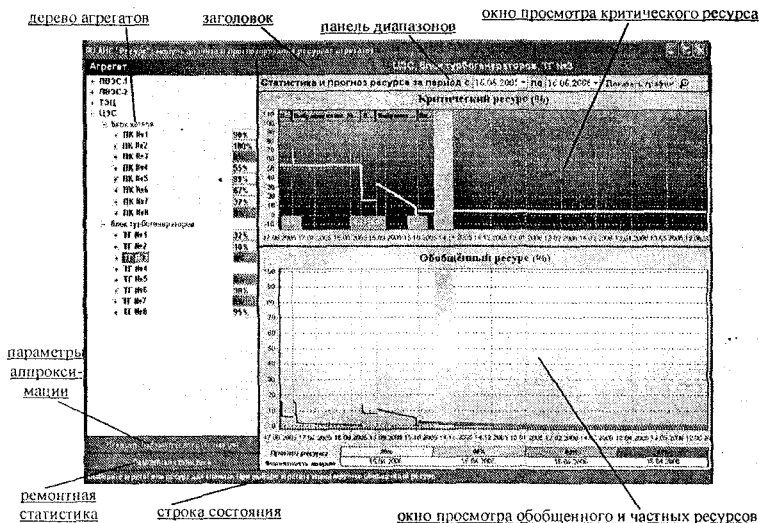


Рис. 5. Главное окно приложения анализа и прогноза ресурсов агрегатов

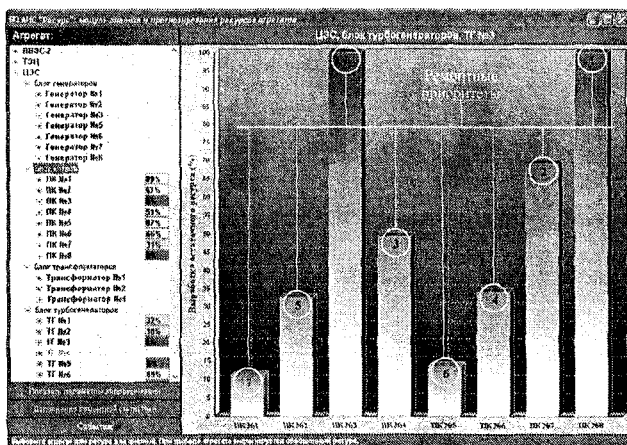


Рис. 6. Внешний вид диаграммы выработки остаточного ресурса агрегатов

При каждом добавлении в базу данных новой записи о параметрах эксплуатационных характеристик агрегата активизируется модуль расчета обобщенного, критического и частных ресурсов. Данный модуль работает на сервере постоянно, в фоновом режиме ожидания добавления новой записи или изменения уже существующей записи.

Настройка параметров работы системы осуществляется посредством программного обеспечения администрирования. Здесь редактируются структурные элементы станций, задаются граничные значения эксплуатационных характеристик, вносятся сведения об авариях и ремонтах.

ПО операторов производственно-технических отделов предназначено для ввода статистических и текущих значений эксплуатационных характеристик контролируемых агрегатов.

ПО технических экспертов обеспечивает расчет и графическое отображение критического и остаточного ресурсов оборудования, графическое отображение частных ресурсов по рассматриваемым показателям работоспособности, расчет и отображение прогнозных значений остаточного ресурса оборудования, вероятностных оценок возникновения аварийных ситуаций на контролируемом оборудовании, а также графиков ремонтных приоритетов.

Таким образом, разработанное программное обеспечение является инструментальным средством, осуществляющим поддержку в задачах мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса контролируемого оборудования, а также в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате анализа особенностей эксплуатации энергетического оборудования электрических станций и сетей многих промышленных предприятий Российской Федерации было установлено, что одним из приоритетных направлений по повышению промышленной безопасности является задача мониторинга и прогнозирования текущего технического состояния контролируемого оборудования. Решение этой задачи целесообразно осуществлять на основе внедрения автоматизированных информационных систем, осуществляющих оценку и прогноз остаточного ресурса агрегатов по данным эксплуатации в реальном времени.

2. Предложена методика оценки текущего остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям в реальном времени на основе данных эксплуатации, позволяющая автоматизировать мониторинг и прогнозирование остаточного ресурса оборудования.

3. Разработан алгоритм оперативного распознавания предаварийных ситуаций на контролируемом оборудовании, основанный на оценке остаточного ресурса по статистическим и текущим значениям рассматриваемых обобщенных показателей работоспособности, позволяющий предупреждать возможные отказы и непредвиденные аварийные ситуации, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и безопасности эксплуатации оборудования.

4. Предложен подход к приоритетному планированию ремонтно-профилактических работ на основе текущих или прогнозных значений оценки остаточного ресурса контролируемого оборудования по обобщенным показателям, позволяющий обоснованно установить очередность проведения

ремонтно-профилактических работ для парка контролируемого оборудования с целью минимизации риска возникновения аварийных ситуаций.

5. Создана программа для ЭВМ «Автоматизирующая информационная система «Ресурс», предназначенная для автоматизации мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования по текущему состоянию в реальном времени, а также ведения информационной базы данных по данному оборудованию.

6. Разработанное программное обеспечение АИС «Ресурс» внедрено в практику мониторинга и прогнозирования остаточного ресурса энергетического оборудования ЦЭС ОАО «ММК», что подтверждается соответствующим актом внедрения результатов диссертационной работы.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ В ВЕДУЩЕМ РЕЦЕНЗИРУЕМОМ ЖУРНАЛЕ, ОПРЕДЕЛЕННОМ ВАК

1. Хасанов, А.Р. Метод гибкого приоритетного планирования ремонтных работ / А.Р. Хасанов, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2004. – Вып.3, №9(38). – С. 98-103.

2. Хасанов, А.Р. Метод оценки текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ / А.Р. Хасанов, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2006. – Вып.4, №14(69). – С. 84-87.

ДРУГИЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хасанов, А.Р. Подход к оперативной оценке остаточного ресурса энергетического оборудования на основе использования генетического алгоритма / А.Р. Хасанов, Д.А. Шнайдер. // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Краткие сообщения. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 392 с.

2. Хасанов, А.Р. Экспертное нормирование показателей частных ресурсов энергоагрегатов с использованием нечеткой логики / А.Р. Хасанов, Д.А. Шнайдер. // XXVI Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2006. – 82 с.

3. Хасанов, А.Р. Алгоритм расчета обобщенного показателя состояния контролируемого энергооборудования на основе нечеткой логики / А.Р. Хасанов, О.В. Попова, Д.А. Шнайдер // Материалы Всероссийской научно-практической Интернет-конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии». – Пермь: Изд. ПГТУ 2006. – С. 252–257.

4. Хасанов, А.Р. Подход к оценке и прогнозированию текущего состояния контролируемого оборудования в задаче оперативного планирования ремонтно-профилактических работ / А.Р. Хасанов, Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер // Материалы Всероссийской научно-практической Интернет-конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии». – Пермь: Изд. ПГТУ 2006. – С. 257–265.