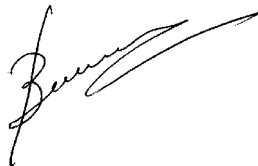


На правах рукописи



**Заверняев Константин Валерьевич**

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ  
СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ С  
УЧЕТОМ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ  
ОТКАЗОВ УЗЛОВ**

Специальность **05.26.03** — Пожарная и промышленная  
безопасность (металлургия)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, **2009**

Работа выполнена на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» ГОУ ВПО Государственный технологический университет «МИСиС»

- Научный руководитель — Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
Мастрюков Борис Степанович
- Официальные оппоненты — Доктор технических наук, доцент  
Грозовский Геннадий Ильич
- кандидат технических наук, доцент  
Лисунец Николай Леонидович
- Ведущая организация — Государственный научный центр РФ  
«ФГУП «Центральный институт авиаци-  
онного моторостроения им. П.И. Баранова»

Защита состоится **«19» марта 2009** года в **15:00** часов на заседании диссертационного совета Д.212.132.04 в ГОУ ВПО Государственный технологический университет «МИСиС» по адресу: **119049**, г. Москва, Крымский вал, д. **3**, ауд. К – **421**. Тел.: **237-21-36, 237-84-45**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Государственный технологический университет «МИСиС».  
Автореферат разослан «\_\_\_» февраля **2009** г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,  
к.т.н., профессор



Муравьев Виктор Александрович

## **1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы.**

В процессе работы техническое состояние деталей технологического оборудования, подвергающихся непрерывным разрушающим воздействиям, непрерывно ухудшается. В результате износа, физического старения, поломок и др. элементов конструкции сложных технологических систем (СТС) может возникнуть повреждение деталей оборудования. Достигнув критического уровня повреждения, накопленные в результате процесса эксплуатации, приводят к нарушению работоспособного состояния оборудования, преждевременной выработке деталью ресурса, и как следствие, к ее отказу. Отказ любого элемента оборудования, в свою очередь, приводит к остановке процесса производства, ухудшая его технологические показатели.

Металлургическое оборудование, имеющее значительный срок службы, относится к высоконагруженным, физически быстро стареющим объектам, которые за срок службы подвергаются многочисленным текущим и нескольким капитальным ремонтам, в результате чего их технические характеристики ухудшаются. Вместе с тем большинство металлургических машин являются уникальными, зачастую они изготавливаются в единственном экземпляре или небольшими партиями. Поэтому для ряда машин или их составных частей не существует достаточно эффективных и обоснованных стратегий выполнения адаптивных планово-предупредительных ремонтов, учитывающих фактическое состояние элементов машины и состояние других СТС, входящих в комплекс оборудования.

Наиболее частым является использование методов статистического моделирования повреждений, учитывающих вероятностные режимы экс-

плутации оборудования, внешние воздействия и характер протекания процессов накопления повреждений. Актуальность такого подхода объясняется необходимостью дальнейшего совершенствования методов прогнозирования трибологической надежности деталей, подвергающихся таким видам повреждений, как изнашивание и усталостное разрушение, имеющих ярко выраженный характер в металлургических машинах, и являющихся основными причинами их отказов.

Решение такой задачи и предопределило цель исследования – создание научно-обоснованной методики прогнозирования и повышения надежности, а так же предотвращения аварий СТС в металлургии как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Разработана методика расчета кинетических параметров надежности для элементов СТС, учитывающих временную зависимость вероятности их отказов.
- На основе разработанной методики реализован алгоритм моделирования и расчета состояния подобных систем.
- Разработан программный комплекс для определения вероятности отказа и прогнозирования надежности как отдельных элементов, так и всей СТС в целом.
- Предложен метод оценки технического состояния существующего металлургического оборудования и даны рекомендации по повышению его надежности в процессе эксплуатации.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что:

- Разработана методика расчета показателей надежности СТС с учетом временной зависимости вероятности отказа их узлов.
- Разработана и адаптирована вычислительная программа моделирования состояния СТС, позволяющая прогнозировать сроки и причины возникновения отказов и аварийных ситуаций.

- Впервые разработан программный комплекс для оценки и прогнозирования технического состояния СТС с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов.

**Достоверность** полученных выводов и расчетов обусловлена использованием современных методов математического моделирования, основанных на фундаментальных формулах и законах теории вероятности и надежности, а также удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, полученных на существующем оборудовании металлургических производств.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в том, состоит в том, что разработанные и приведенные в данной работе метод и программный комплекс для его реализации позволяют проводить оценку надежности любой СТС, прогнозировать и предотвращать отказы и аварии на производстве, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации СТС.

**Апробация работы и публикации.** Результаты работы были доложены на IV Международной научно-практической конференции «Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении» (г. Москва, 3 – 4 апреля 2008 г.). Основные положения работы опубликованы в трудах этой конференции и в двух статьях в центральных научных журналах.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 2 приложений. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков и 2 таблицы.

Библиографический список использованной литературы содержит 162 наименования.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методика исследований.

**В первой главе** проведен анализ существующих методов исследования надежности СТС в металлургии, в отношении как к существующему оборудованию в процессе эксплуатации, так и к оборудованию на этапе проектирования. Рассмотрены общие методики статистического анализа систем, наиболее распространенные математические модели.

Выявлено, что методы разрушающего и неразрушающего контроля, являясь эффективными для контроля за наличием дефектов, качеством и надежностью отдельных элементов металлургического оборудования, несмотря на свое многообразие, могут быть применены только к элементам (деталям) на этапе эксплуатации.

Как показал анализ, наиболее точно надежность проектируемых металлургических машин можно описать при помощи вероятностных математических моделей, основанных на различных законах распределения и анализе временных рядов данных по отказам узлов и деталей оборудования. На основании рассмотренных данных выработана общая концепция, согласно которой была выстроена математическая модель и в качестве основного принято распределение Вейбулла – Гнеденко.

В результате анализа так же установлено, что практически все существующие программные комплексы по расчету и прогнозированию надежности не учитывают временной зависимости вероятности отказов узлов (деталей) оборудования. Программные методы, позволяющие решить данную проблему, работают только на основе априорных статистических данных по отказам, что, в силу уникальности большей части металлургического оборудования, не позволяет их применять на этапе проектирования.

На основании вышесказанного можно сделать вывод об отсутствии аналогов создаваемой методике прогнозирования надежности.

**Во второй главе** описана разработанная методика и реализованная на ее основе математическая модель исследования показателей надежности с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов.

Подобная модель позволяет закладывать основы безопасности и надежности металлургического оборудования уже на стадии проектирования, тем самым расширяя возможности и методы предотвращения отказов и аварийных ситуаций.

При разработке математической модели и алгоритма прогнозирования надежности были приняты следующие ограничения и допущения:

- каждое из событий системы бинарно и независимость в совокупности всех выделенных бинарных событий;
- процессы восстановления и ремонта конструктивных элементов СТС рассматриваются как мгновенная замена деталей;
- в моделях надежности законы распределения времени работы всех элементов принимаются по закону Вейбулла;
- вероятностные характеристики элементов статистически устойчивы;
- учитываются не механизмы износа, а рассматривается общая вероятностная природа отказов.

Основанная на общих принципах формирования отказов, данная модель обеспечит: разработку алгоритмов оценки надежности сложных изделий, учет обратных связей во взаимоотношении «технологический процесс — выходные параметры машины», оценку взаимодействия параметров машины и особенностей потери ею работоспособности. Решение этих задач дает возможность разрабатывать более совершенные модели отказов разнообразных элементов (деталей, узлов, механизмов) металлургических машин.

Наиболее часто отказы оборудования происходят на первом и третьем периодах работы типичной кривой износа, характеризующей изменение состояния детали во времени. Но, т.к. первый этап (приработка) носит достаточно кратковременный характер и является неотъемлемой частью

работы детали, то наибольший практический интерес представляет этап износа.

Алгоритм, на котором основана разработанная в диссертационной работе модель прогнозирования состоит в следующем:

На первом этапе формируется «дерево отказов» СТС, определяются исходные и промежуточные предпосылки, устанавливаются логические связи и входные параметры узлов.

Начиная с момента окончания периода нормальной эксплуатации, производится расчет технического состояния каждой детали с периодичностью (шагом)  $\Delta t$ . Значение вероятности отказа в этот период (нормальной эксплуатации) принимается постоянным, являясь основным входным параметром модели.

Основной этап алгоритма – нахождение величины степени износа детали  $\lambda_i$  в текущий момент времени. Характер износа детали (узла) в период интенсивного износа носит вероятностный характер, что в разработанной модели учитывается применением метода Монте-Карло к распределению Вейбулла-Гнеденко, плотность вероятности отказов которого, применительно к разыгрываемой переменной, представляется в виде:

$$f(x) = \alpha \cdot \lambda_{\text{СТАТ}} \cdot \lambda^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda_{\text{СТАТ}} \cdot \lambda^{\alpha}}$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий особенности детали;

$\lambda$  – разыгрываемое значение интенсивности отказа;

$\lambda_{\text{СТАТ}}$  – расчетное значение интенсивности отказа;

Статистический ряд значений  $\lambda_i$  формирует мультипликативный конгруэнтный датчик случайной величины. Каждое полученное значение проверяется на соответствие двум критериям, из отобранных значений и формируется ряд  $\lambda_i$  (рис.1):



1.  $\lambda_{\text{СТАТ}} < \lambda_1$  для вычисления первого шага  $\Delta t_1$ , и  $\lambda_i < \lambda_{i+1}$  для последующих интервалов  $\Delta t_i$ , поскольку степень износа детали со временем уменьшаться не может;

2. Разыгрываемое значение должно находиться в области соответствующей плотности распределения для данного шага.

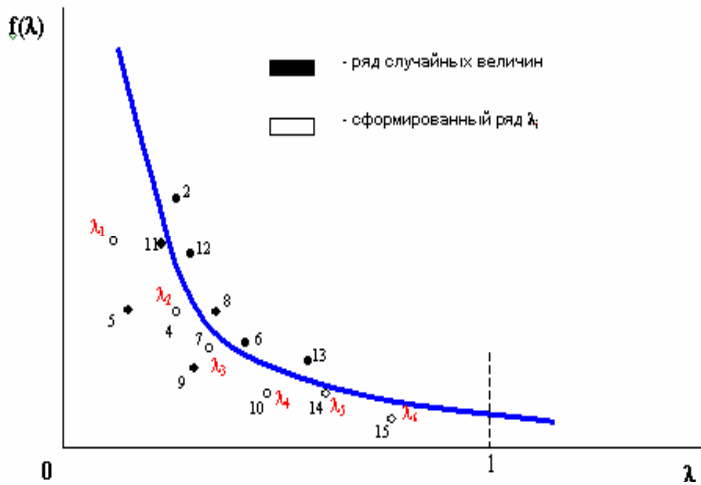


Рис. 1. Формирование ряда случайных величин интенсивности отказа узла.

На основе полученных случайных значений пошагово вычисляются значения вероятности отказа детали (узла)  $P_i$  на каждом шаге  $\Delta t_i$  (рис. 2).

Построение продолжается пока значение вероятности отказа не окажется либо равным 1, либо, если задан дополнительный параметр наработки на замену  $P_{\text{зам}}$ , происходит имитация замены детали. После «замены» элемента вычисление всех случайных величин происходит заново, т.о. для каждой «новой» детали, учитывая случайность физических свойств нового элемента, формируется свой ряд случайных величин (рис.2).

Для определения вероятности отказа детали для каждого шага в модели используется выражение:

$$P(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}$$

где  $\tau$  - время работы СТС,

$\lambda$  – значение интенсивности отказа на данном шаге моделирования.

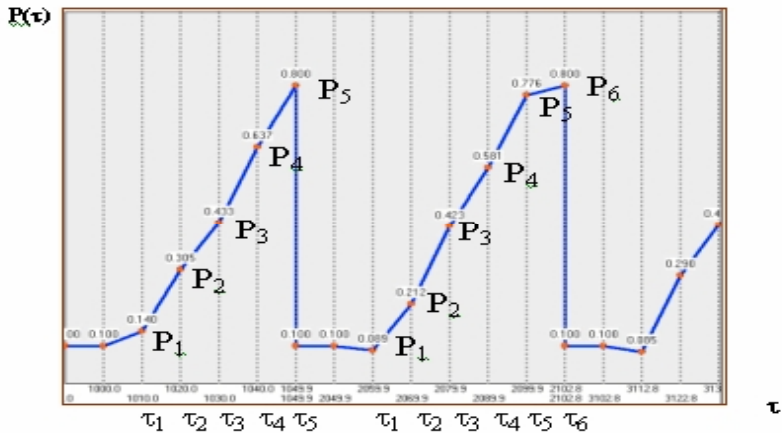


Рис. 2. Построение зависимости  $P(\tau)$  элемента (узла).

Далее, в соответствии с логическими условиями отказов деталей, входящих в состав каждого узла, происходит расчет технического состояния узлов и всей СТС. Выходным параметром модели является вероятность отказа  $P(\tau)$  узла или сложной технологической системы.

На основе разработанной методики и алгоритма моделирования создан программно-вычислительный комплекс (рис.3) для расчетов показате-

телей надежности сложных систем, позволяющий учитывать временную зависимость вероятности отказов узлов (деталей).

Разработанная программа написана на языке программирования Си++, имеет простой и доступный интерфейс, аналогичный стандартному интерфейсу **Windows**-программ.

Рабочее окно программы (рис. 3.) состоит из области моделирования, где строится дерево отказов СТС, и главной панели инструментов с основными функциональными кнопками, которые позволяют создать новый проект, открыть либо сохранить существующий, экспортировать расчетные данные в **Excel**, редактировать основные рабочие настройки программы.

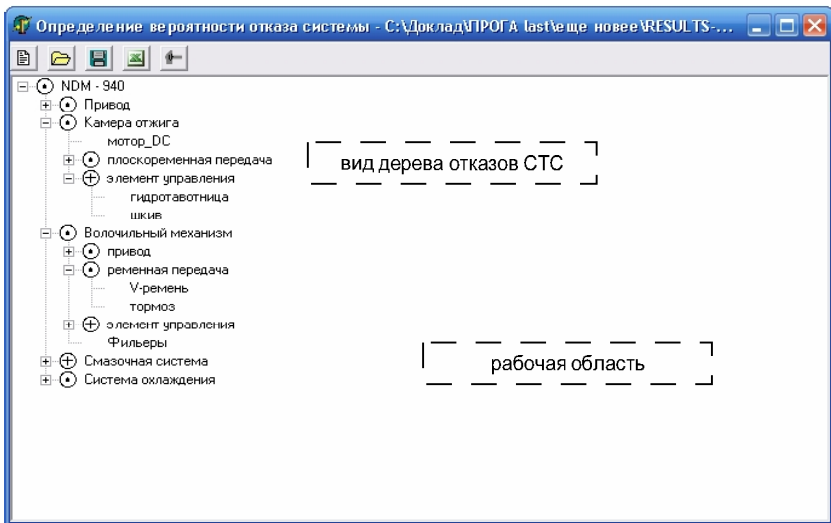


Рис. 3. Внешний вид программы

При клике правой кнопкой мыши на рабочее поле программы открывается рабочее меню, при помощи которого создаются, добавляются и

редактируются новые элементы, а также задаются основные свойства исходных деталей и логические свойства узлов (рис.4).

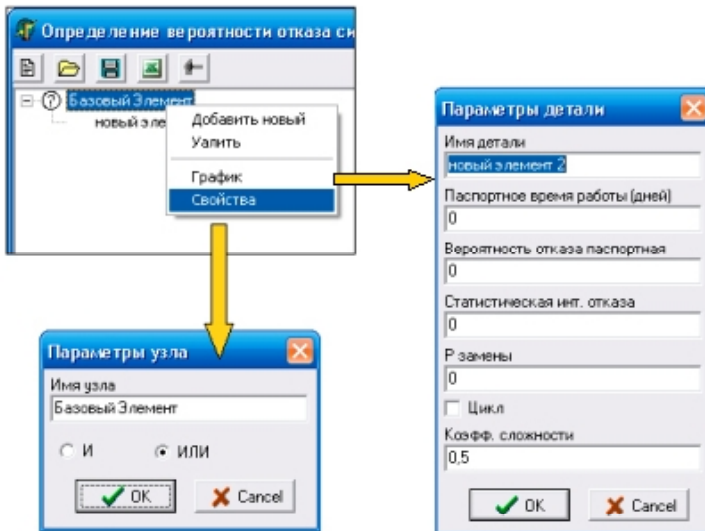


Рис. 4. Свойства узлов и деталей

После создания «дерева отказов» и задания необходимых свойств элементов, клик правой кнопкой мыши на любой из элементов позволяет просмотреть результаты моделирования, которые отображаются в виде зависимости вероятности отказа от времени.

Работу с графиками облегчают функции зуммирования (приближения и удаления) графика, сохранение видимого участка в файл изображения, а так же возможность экспорта расчетных данных в виде таблиц **MS Excel**, где можно более детально анализировать полученные расчеты, и накапливать псевдостатистику по отказам любых деталей.

**В третьей главе** проведена адаптация и проверка адекватности разработанной математической модели, а так же сопоставление расчетных данных с данными по отказам существующего оборудования.

Прежде чем опробовать программный комплекс применительно к существующему оборудованию, было принято решение проверить правильность поведения разработанной модели следующим образом:

1) Смоделировать дерево отказов гипотетической СТС (рис. 5.), состоящее из трех уровней:

- а) головного события А (отказ системы);
- б) промежуточных исходных предпосылок Узел 1, Узел 2, Узел 3;
- в) исходных предпосылок - Детали 1-1, 2-1, 1-2, 2-2, 1-3, 2-3.

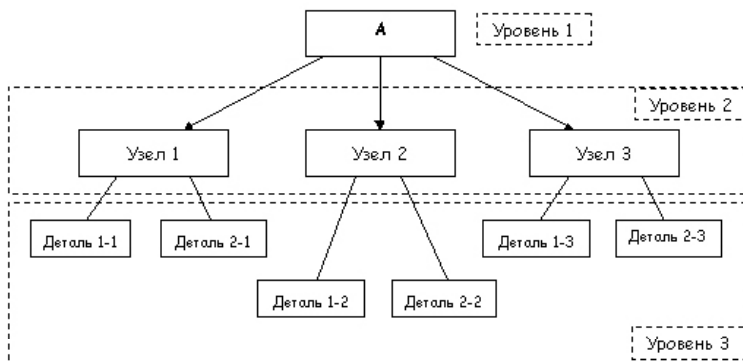


Рис. 5. Дерево отказов гипотетической СТС

2) Для упрощения эксперимента входные параметры исходных предпосылок приняты одинаковыми (стандартная деталь).

3) Очевидно, что адекватная модель должна соответствующим образом реагировать на появление малонадежных элементов, поэтому была

введена СПЕЦ-деталь – исходная предпосылка с заведомо менее надежным параметром.

4) При помощи замены стандартных деталей СПЕЦ-деталью, а также путем комбинирования логических свойств промежуточных предпосылок и головного события, проведен **21** эксперимент.

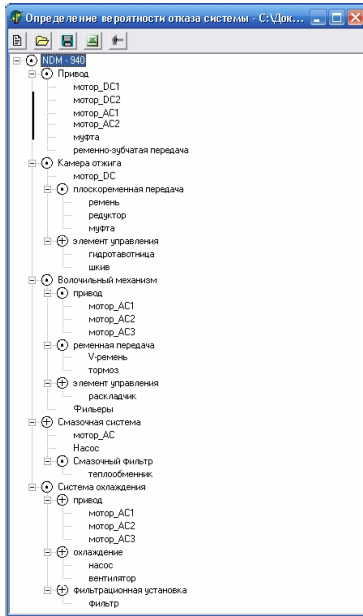
Получены показатели состояния исходных предпосылок – стандартной детали и СПЕЦ-детали, состояния промежуточных предпосылок с логическими свойствами «И» и «ИЛИ», с комбинациями стандартных и СПЕЦ-деталей, и графики технического состояния СТС. Полученные данные говорят о том, что модели деталей вычисляются в точности согласно сделанным предположениям, - моделирование каждой исходной предпосылки происходит именно до заданных параметров на замену.

Этот факт говорит о том, что алгоритм вычисления показателей надежности промежуточных предпосылок и головного события, а так же код программы в программно-вычислительном комплексе прописаны верно.

После проверки корректности поведения математической модели, была проведена **адаптация** программно-вычислительного комплекса применительно к функционирующей металлургической машине. Полученные при помощи разработанной методики и программы результаты были сопоставлены с данными журналов по ремонту.

В качестве объекта исследования использована волочильная машина **Niehoff Drawing Machine NDM-940**, «дерево отказов» которой (рис.6) сформировано на основе конструкторской документации с учетом только основных узлов и элементов.

На кривую зависимости вероятности отказа **NDM-940** от времени, полученной помощи программы были наложены данные об отказах и ремонтах элементов и узлов оборудования по временной шкале (рис. 7). Отказы элементов и узлов оборудования пронумерованы и отмечены на графиках временными событиями.



Как можно видеть из сопоставления данных, разработанная модель позволяет достаточно точно прогнозировать временные интервалы с наиболее частыми и наиболее вероятными отказами, т.е. скопление отказов по реальным данным соответствует пиковым значениям на полученных графиках.

Чтобы более четко определить точность совпадения результатов моделирования с реальными показателями по каждому из элементов и узлов **Niehoff Drawing Machine NDM-940**, имеющиеся данные по их отказам сопоставлены с соответствующими узлам графиками зависимости вероятности отказа от времени работы.

Рис. 6. «Дерево отказов» Niehoff Drawing Machine NDM-940.

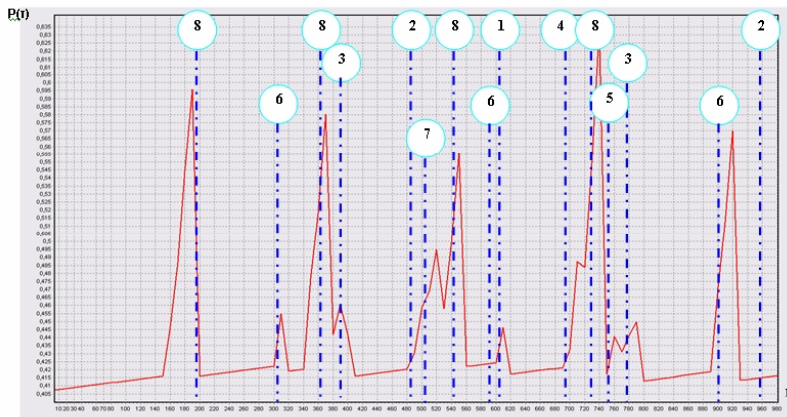


Рис. 7. Наложение данных по отказам.

Полное соответствие модели надежности волочильных фильер (рис.8) реальным данным по отказам, наиболее наглядно показывает адекватность разработанной математической модели и способность разработанного программного комплекса моделировать параметрическую надежность СТС. Последние 2 события, несоответствующие графику, объясняются тем, что на волочильную машину были установлены фильеры нового образца из материала, обладающего большим сопротивлением износу, что практически вдвое увеличило срок службы исследуемого элемента.

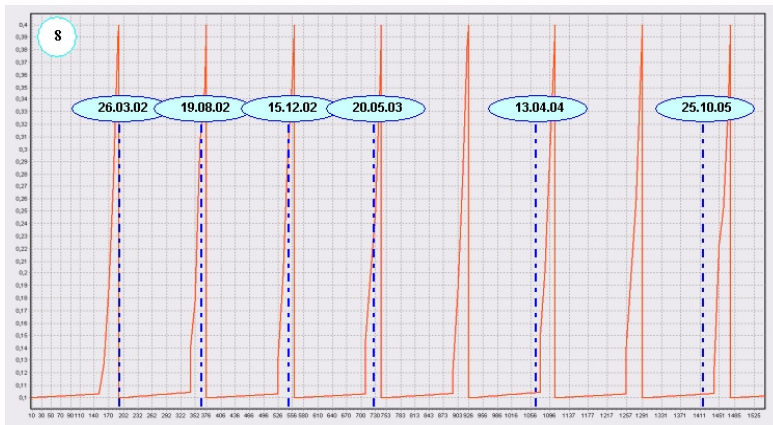


Рис. 8. Наложение данных по отказам (событие 8).

Сопоставление результатов моделирования с реальными данными по отказам оборудования позволяет утверждать, что разработанный алгоритм, математическая модель прогнозирования и созданный на их базе программно-вычислительный комплекс позволяют исследовать надежность сложных технологических систем в металлургии с учетом временной зависимости вероятности отказов конструктивных узлов.

**В четвертой главе** проведено исследование параметрической надежности автоматизированного горячештамповочного комплекса на базе кривошипного прессы КГ 8042.



Играя большую роль в заготовительном и переделном производствах, кузнечно-прессовые цеха являются неотъемлемой частью всех крупных современных металлургических заводов.

Был проанализирован принцип работы комплекса, а так же подробно изучены конструкции основных узлов, входящих в его состав, что обеспечило корректное построения «дерева отказов». Была рассмотрена только основная часть автоматизированного комплекса, а именно – кривошипный горячештамповочный пресс, фрикционная муфта, дисковый тормоз, грейферный переключатель и механизм подачи заготовок в пространство прессы, поскольку отказы элементов именно этих узлов комплекса наиболее часто приводят к остановкам оборудования и авариям.

Результатом моделирования работы исследуемого горячештамповочного комплекса (ГШК) стали данные, которые позволяют прогнозировать и оценивать надежность данной сложной технологической системы, изучить, какие из элементов наиболее сильно влияют на параметры безотказной работы комплекса, и дать соответствующие рекомендации по замене и модернизации деталей и узлов.

По полученным данным о работе всего комплекса (рис.9) можно сделать вывод о неудовлетворительном характере поведения системы – средняя вероятность отказа  $P_{\text{ср}} - 0,55-0,58$ , с максимальными значениями  $P_{\text{max}}$  до **0,9**. Полученный график практически не имеет ровных (стабильных) участков, с постоянными скачками значений  $P(t)$  от **0,45** до **0,6**. Максимальные (критические) значения повторяются с интервалами в **260-270** дней. По этим данным можно судить о том, что работа ГШК в нынешнем конструктивном исполнении будет сопровождаться большим количеством отказов и остановок оборудования, а следовательно увеличением опасности возникновения аварийных ситуаций.

По данным моделирования основных узлов, входящим в исследуемую СТС установлено, что работа механизма подачи заготовок является наиболее стабильной, среди узлов. Грейферная подача, как конструктивный узел, так же незначительно влияет на поведения всей рассматриваемой технологической системой, а наибольшее количество отказов и ава-

рий во время эксплуатации придется на детали и узлы, входящие в состав прессы КГ8042.

$P(t)$

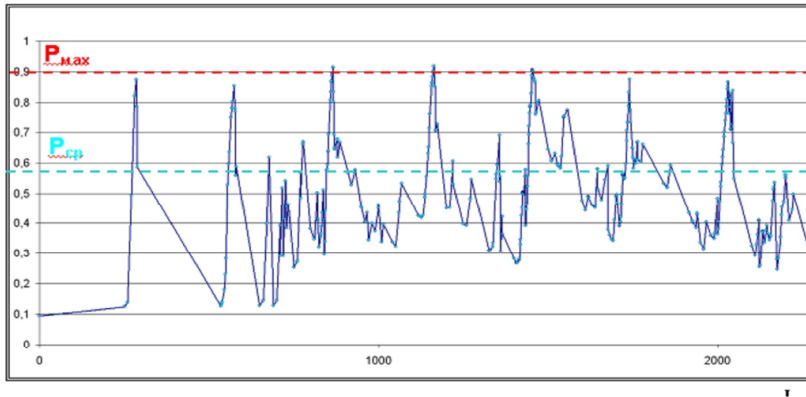


Рис. 9. Результаты моделирования. ГШК.

Анализ результатов моделирования для элементов прессы в режиме реального времени (в диалоговом режиме построения графиков программно-вычислительного комплекса) показал, что влияние на стабильность работы прессы оказывает дисковый тормоз и фрикционная муфта, в частности, входящие в ее состав фрикционные элементы ведущего и ведомого дисков, разрушение которых происходит с периодичностью **255-270** дней.

Детальный анализ конструкции фрикционной муфты прессы выявил следующий основной недостаток - малый срок службы фериодо-дисков, их быстрый износ и срыв сегментов, что может являться как следствием плохого охлаждения дисков муфты, так и неудовлетворительных механических свойств материала.

На основании этого были даны рекомендации по модернизации конструкции муфты, в частности, проведению дополнительных исследований на предмет оптимальной вентилируемости фрикционных, увеличения количества поверхностей трения и толщины ведомого и ведущих

дисков, а так же замены материала элементов трения на более износостойкий.

Для проверки обоснованности рекомендаций был проведен перерасчет и моделирование комплекса с муфтой усовершенствованной конструкции, и полученные результаты (рис. 10), показали, что выполнение вышеуказанных рекомендаций по изменению конструкции фрикционной муфты приведет к улучшению работоспособности всей технической системы.

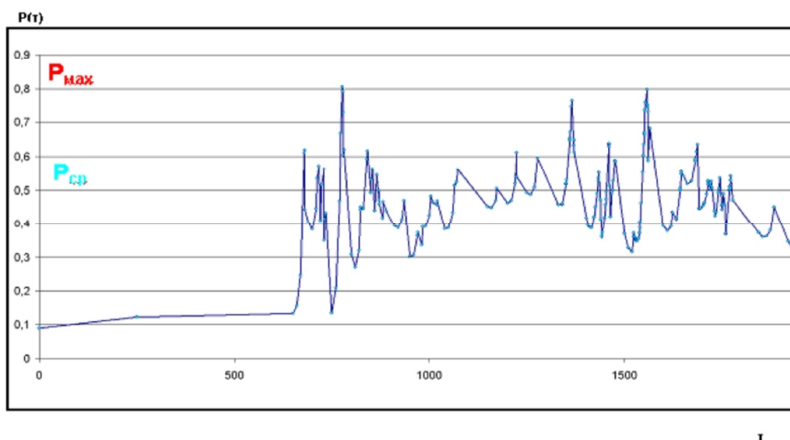


Рис. 10. Результаты моделирования. Модернизированный ГШК.

Благодаря увеличению срока службы фрикционных дисков муфты до **700-750** дней и снижению критических значений до **0,3**, удалось улучшить показатели надежности (снизить вероятность отказа) самой муфты, а так же пресса – средние значения вероятности отказа снизились почти в **2** раза - с **0,52** до **0,3**. Помимо этого на модели прогнозирования работоспособности пресса появились ровные участки, что свидетельствует о более стабильном графике его работы.

В целом прогнозируемые показатели модифицированной сложной технологической системы (горячештамповочного комплекса на базе кри-

вошипного пресса КГ8042) так же значительно улучшились, как визуально, - наблюдаются меньшие перепады значений вероятности отказа комплекса, - так и по численным показателям: критические значения  $P_{\max}$  снизились до 0,8, а показатель  $P_{\text{ср}}$  - до 0,47-0,49. Одновременно с этим уменьшилась частота появления пиковых (критических) значений до 750 – 800 дней, и на графике, в периодах между максимумами, сформировались относительно стабильные участки.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что существующие методы математического моделирования (чего?) имеют существенные недостатки, в частности, они не учитывают изменение показателей надежности технических систем во времени ( $\lambda = \text{const}$ ). Построение модели СТС с учетом временных зависимостей возможно только при наличии полных статистических данных по отказам элементов оборудования (уже существующего или прошедшего испытания). Уникальность металлургического оборудования не позволяет собрать достаточную базу статистики по отказам, а применение методик прогнозирования, не рассматривающих период повышенного износа, ведет к потере информативности.
2. Разработана методика и математическая модель прогнозирования надежности СТС в металлургии с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов, на основе которых создан программно-вычислительный комплекс для прогнозирования надежности с простым и доступным интерфейсом, требующим от пользователя только базовых навыков владения ПК.
3. Программно-вычислительный комплекс апробирован как на теоретической системе, так и применительно к существующей волочильной машине **Niehoff Drawing Machine NDM-940**. Сопоставление результатов моделирования с реальными данными по отказам оборудования позволяет утверждать, что разработанная математическая модель прогнозирования адекватно описывает реальный процесс и созданный на ее базе программно-вычислительный комплекс позволяет исследовать надежность СТС в металлургии с учетом временной зави-

симости вероятности отказов конструктивных узлов.

4. Доказано, что разработанный программно - вычислительный комплекс позволяет достаточно просто рассматривать сложные системы любого объема, без использования априорных (статистических) данных об отказах элементов оборудования, формируя их непосредственно в процессе работы. Это позволяет использовать программу при проектировании нового оборудования, предотвращая возможные аварии уже на стадии разработки.
5. Проведено исследование работы СТС в виде горячештамповочного комплекса на базе кривошипного прессы КГ8042 при помощи разработанного программно-вычислительного комплекса.
6. Исследование позволило дать рекомендации по усовершенствованию конструкции отдельных узлов прессы.
7. С использованием программного комплекса создана модернизированная модель ГШК, показатели вероятности отказа элементов которого оказались значительно ниже показателей исходной технологической системы, что подтвердило правомерность данных рекомендаций.
8. Применение разработанных в диссертационной работе методики и программно-вычислительного комплекса для прогнозирования изменения технического состояния СТС в металлургии, с учетом временной зависимости вероятности отказов узлов, позволяет рассматривать достоинства и недостатки работы элементов СТС как по отдельности, так и «в сборе» уже на стадии проектирования оборудования.
9. Прогнозирование программными методами отказов оборудования, причин и возникновения аварийных ситуаций уже на этапах проектирования технологических систем является одним из важнейших направлений обеспечения безопасности на металлургических производствах.

#### **4. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ**

1. Заверняев К.В., Мاستрюков Б.С. Исследование надежности горячештамповочного комплекса // БЖД. – 2007. – № 11, с.20-23.
2. Заверняев К.В., Мастрюков Б.С. Новый подход к исследованию надежности металлургического оборудования// Металлург, №9, 2006, с. 29-32.
3. Мастрюков Б.С., Заверняев К.В. Прогнозирование металлургического оборудования на стадии проектирования. Труды IV Международной научно-практической конференции «Печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии и машиностроении» (г. Москва, 3 – 4 апреля 2008 г.). М.-МИСиС, 2008, с.45-47.