

АГЕНТНАЯ СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Ф. Берман

Институт динамики систем и теории управления СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134
E-mail: berman@icc.ru

О.А. Николайчук

Институт динамики систем и теории управления СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134
E-mail: nikoly@icc.ru

А.И. Павлов

Институт динамики систем и теории управления СО РАН
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134
E-mail: Asd@icc.ru

Ключевые слова: автоматизация исследования безопасности, сложная техническая система, уникальная механическая система, агентное моделирование, продукции, прецеденты

Аннотация: Рассмотрена система имитационного моделирования динамики состояния сложных технических систем, имеющих в своем составе уникальные механические системы. Представлена модель агента, классы состояний, отражающие стадии (этапы) процесса изменения технического состояния: от состояния исходной дефектности до отказа. Моделирование динамики основано на применении логико-математической модели, объединяющей экспертные знания и аналитические модели для реализации поведения агентов. Результаты имитационного моделирования являются основой поддержки принятия решений при обеспечении безопасности на всех стадиях жизненного цикла промышленных объектов.

1. Введение

Отказы сложных технических систем (СТС), используемых для реализации опасных процессов при экстремальных значениях параметров взрывопожароопасных и токсичных сред, являются источником техногенных чрезвычайных ситуаций. Социальные, экономические и экологические последствия подобных техногенных чрезвычайных ситуаций обуславливают необходимость совершенствования научных основ обеспечения техногенной безопасности. Значительное число отказов СТС и последующих за этим аварий обусловлено отказами уникальных механических систем, входящих в состав СТС. Под уникальными механическими системами понимаются системы, изготавливаемые в 1...5 экземплярах, эксплуатируемые в отличающихся

условиях и реализующие экстремальные технологические операции в составе СТС. Отказы уникальных механических систем обусловлены процессами деградации их свойств до такой степени, когда уникальные механические системы перестают выполнять возложенные на них функции, в частности, обеспечение безопасности.

Предотвращение аварий технических систем связано с задачей понижения возможности отказов уникальных механических систем, которая, в свою очередь, в значительной степени зависит от прогнозирования динамики их технического состояния. Последняя определяется факторами, обуславливающими протекание деградационных процессов в элементах уникальных механических систем. Под деградационным понимается механо-физико-химический процесс, протекающий в материале детали, обуславливающий одновременное изменение технического состояния элементов иерархии: «деталь – сборочная единица – механическая система – техническая система», и приводящий к прекращению функционирования и/или нарушению безопасности эксплуатации системы [1-3].

Применение современных технологий имитационного моделирования является одним из эффективных способов решения задачи прогнозирования и исследования, в том числе технического состояния СТС. Сложная техническая система – это объект со сложной структурой и его состояние складывается из состояний большого числа разнотипных элементов, поэтому для моделирования динамики технического состояния целесообразно использовать агентное моделирование, позволяющее исследовать поведение объектов, содержащих большое число подсистем и обладающих индивидуальным поведением [4, 5].

Для рассматриваемой проблемы очень важным преимуществом агентного моделирования является то, что, в отличие от моделей системной динамики или дискретно-событийных моделей, здесь нет необходимости подробно определять поведение системы в целом, разработка модели возможна при отсутствии глубоких знания о глобальных зависимостях. Агентную модель можно построить, опираясь на знания об индивидуальной логике поведения объектов. А информацию об особенностях динамики системы в целом можно вывести из результатов исследования поведения модели. Агентную модель проще поддерживать: уточнения обычно делаются на локальном уровне и не требуют глобальных изменений [4].

Другой особенностью исследования состояний СТС, обусловленных отказами уникальных механических систем, является отсутствие статистической информации о динамике изменения технического состояния, что влечет необходимость использования методов искусственного интеллекта, в частности, экспертных систем.

В данной работе представлена интеллектуальная агентная модель и система, реализующие имитационное моделирование процесса исследования и обеспечения безопасности на примере оборудования нефтехимического производства полиэтилена низкой плотности при сверхвысоком давлении.

2. Алгоритм агентного моделирования

Представим СТС (производство полиэтилена) в виде иерархии элементов (рис. 1). Каждому структурному элементу соответствует агент модели. Агент имеет описание структуры своих состояний, алгоритм идентификации состояний и информационно-логико-математическое обеспечение в виде БД, экспертных систем [6-8] и математических модулей.

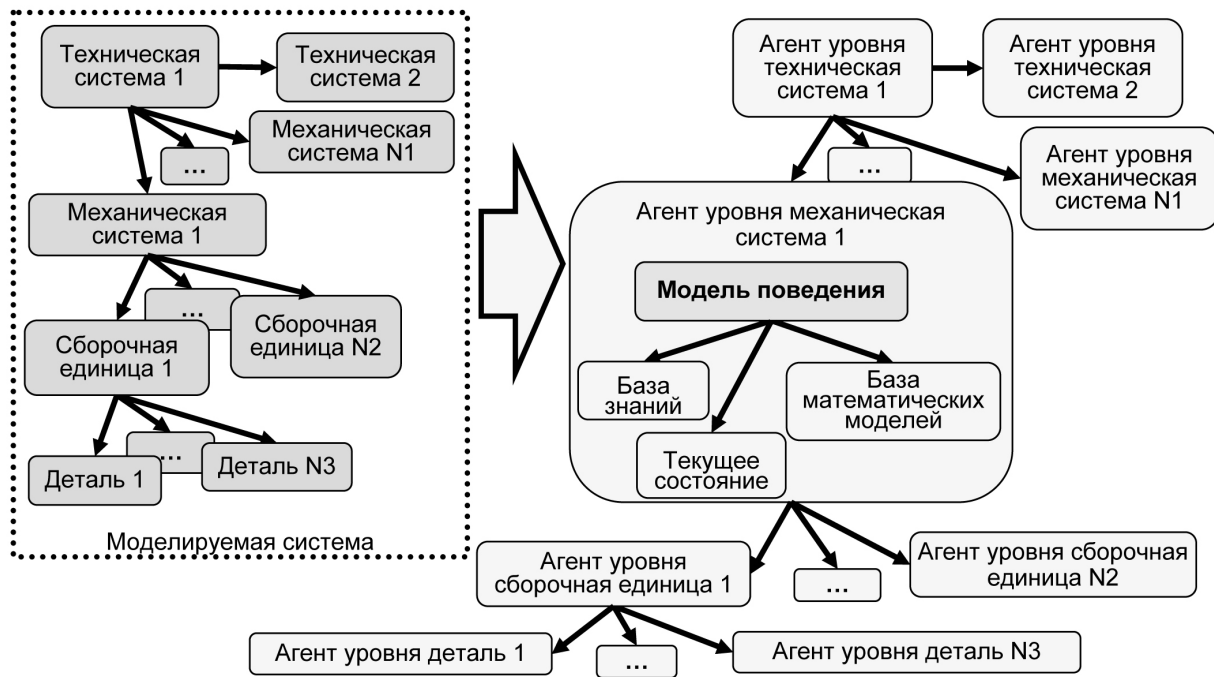


Рис. 1. Представление технической системы в виде иерархии агентов.

Структуру состояний описывает схема на рис. 2 [1]. Состояния рассматриваются на различных информационных уровнях с точки зрения функционирования (исправен/не исправен), технического состояния (описание параметров согласно техническим требованиям), физического состояния (описание механо-физико-химических параметров деградиационных процессов) и самих деградиационных процессов (их механизм как сочетание воздействующих факторов и свойств исследуемого объекта, и кинетика как последовательность событий развития процесса). На информационных уровнях выделены классы состояний. Каждый класс описывает непрерывную динамику технического состояния. Переходы между классами описывают дискретную составляющую, которая отражает скачкообразный переход состояния из одного класса в другой, когда кардинально могут изменяться как значения параметров состояния, так и их множество.

Непрерывная динамика описывается на основе математических/эмпирических моделей, а дискретная – на основе знаний. Знания отражают накопленный опыт в виде описаний имевших место отказов и аварий, теоретических знаний, описывающих деградиационные процессы и закономерности их протекания, и знаний экспертов-специалистов в области структурной и прочностной надежности и безопасности техногенных объектов.

Алгоритм имитационного моделирования представляет собой последовательное исследование каждого класса состояний на всех информационных уровнях, начиная с уровня деградиационных процессов и заканчивая функциональным уровнем. При исследовании класса состояний на вход поступают исходные данные о свойствах объекта, воздействующих факторах и результаты предыдущих этапов исследования, на выходе определяются параметры технического состояния. Задача определения параметров решается на основе комплексного использования прецедентной и продукционной экспертных систем и библиотеки математических моделей.

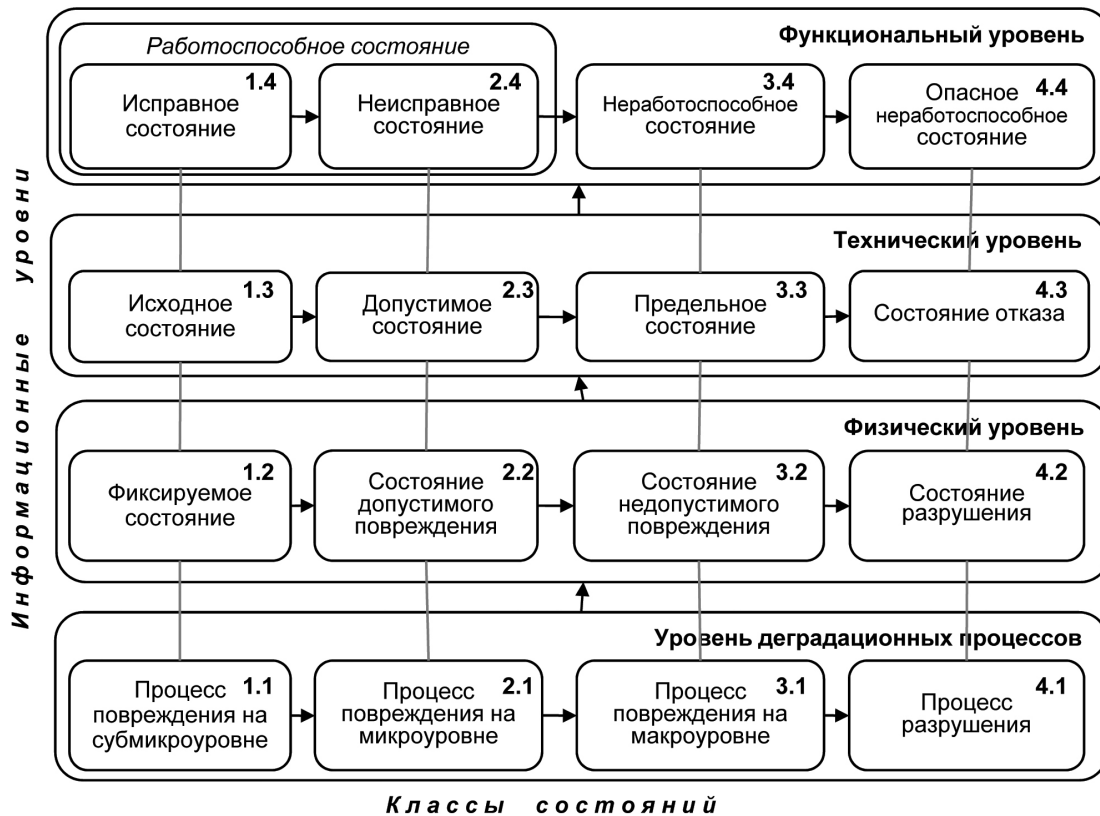


Рис. 2. Классы состояний механической системы и ее элементов.

На каждом шаге имитационного моделирования, соответствующем одному такту модельного времени, имеется очередь агентов, формирующая план вычисления. Объекты данной очереди расположены в соответствии со структурной иерархией (от детали до технической системы). В начало очереди помещаются агенты, которые не имеют составных частей. В рассматриваемом примере – это детали. В конце очереди находятся агенты, не входящие в состав других агентов. В примере – это техническая система. Процесс вычисления движется в направлении от простых агентов (агенты деталей) к составным (агенты технических систем). Согласно очереди, на каждом шаге моделирования будет происходить вычисление текущего (нового) состояния каждого агента модели. Алгоритм отдельного шага имитационного моделирования состоит из трех этапов (рис. 3):

- 1) Активация агента, находящегося на первой позиции очереди текущего шага моделирования, с последующим его удалением из этой очереди.
- 2) Получение активированным агентом управления и осуществление им вычисления своего нового состояния в соответствии с моделью поведения и текущим состоянием агентов, отвечающих за поведение его составных элементов. Например, состояние агента механической системы вычисляется на основе информации о текущем состоянии всех подобъектов (сборочных единиц, входящих в ее состав) и собственного состояния на предыдущем шаге.
- 3) Деактивация агента и добавление его в формируемую очередь следующего шага моделирования.

Предложенный подход реализован в системе имитационного моделирования динамики состояний СТС.

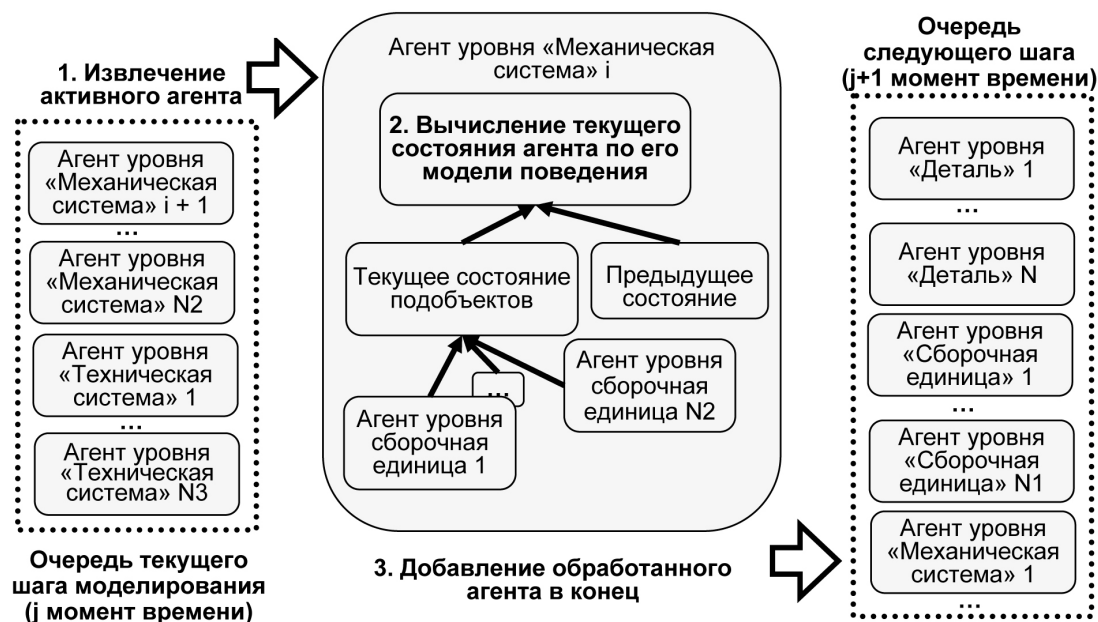


Рис. 3. Алгоритм моделирования за один такт моделирования.

Основными функциями системы являются:

- ввод, хранение и управление данными;
- задание структуры и логики модели;
- планирование и запуск экспериментов;
- имитационное моделирование;
- визуализация, контроль структуры, логики модели, входных данных и динамики прогона модели;
- мониторинг модели и формирование промежуточных и конечных результатов.

3. Пример применения агентного моделирования

Рассмотрим в качестве объекта исследования уникальную механическую систему «трубчатый реактор», являющуюся компонентом «Производства полиэтилена низкой плотности» и выполняющую функцию обеспечения теплообмена при высоком давлении рабочей среды трубного пространства и контактирующей среды в межтрубном пространстве (в рубашке).

Основными составными частями уникальной механической системы являются сборочные единицы «гнутая труба в рубашке» и «прямая труба в рубашке». В свою очередь, составной частью каждой сборочной единицы является деталь «теплообменная гнутая труба» или «теплообменная прямая труба». В межтрубном пространстве циркулирует теплообменная среда (механически и химически очищенная вода при давлении 3...4 МПа и температуре 290...300°C), в толстостенной трубе перемещается взрывопожароопасный газ (давление до 250 МПа, температура 290...300°C) и продукт полимеризации этого газа (полиэтилен).

Подобные параметры процесса и перерабатываемые вещества характеризуются как опасные и позволяют классифицировать объект как опасный.

Для данного опасного объекта детализируем имитационную модель изменения его технического состояния во времени (рис. 4). В рассматриваемом примере интервал

модельного времени – $[0, 26\,000 \text{ ч.}]$, шаг – 10 ч. При запуске процесса моделирования агенты уровня «Деталь» находятся на уровне нежелательных процессов, в первом подпространстве состояний «процессов повреждения на субмикроуровне», блок 1.1. С учетом входов системы, характеризующих параметры среды, нагрузки и свойств объекта, описывающих материал, на основе агрегации методов продукционной и прецедентной экспертной системы осуществляется вывод о механизмах и кинетике возможных нежелательных (деградационных) процессов (рис. 5).

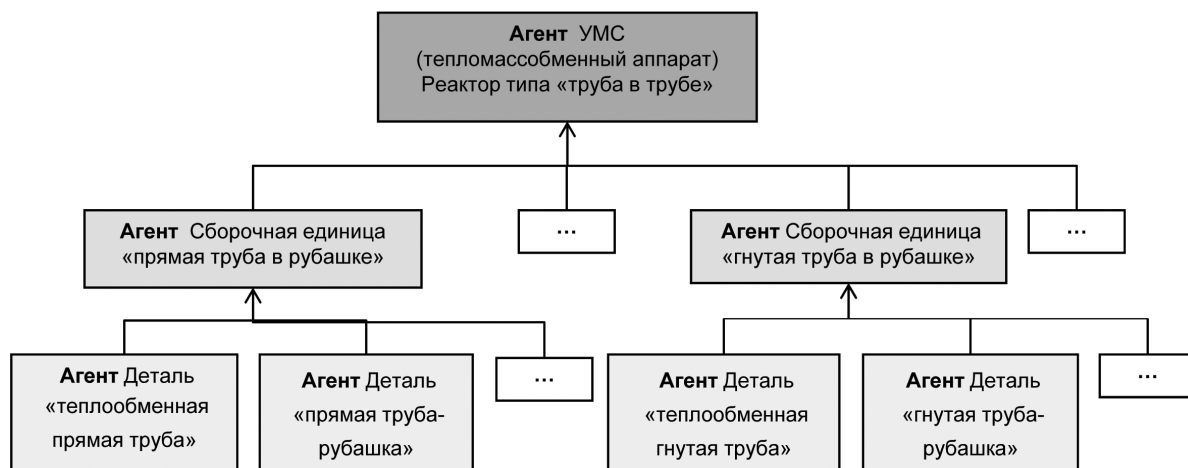


Рис. 4. Структура агентной модели реактора типа «труба в трубе».

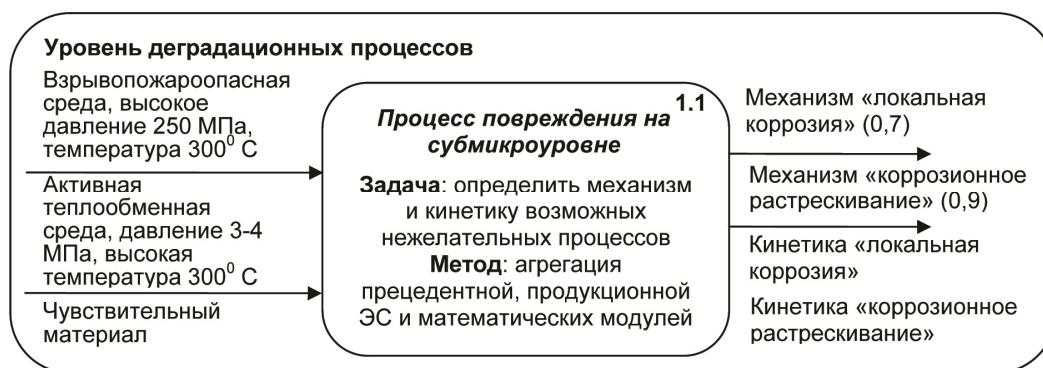


Рис. 5. Схема работы блока 1.1 модели при вычислении текущего состояния агента Детали.

В рассматриваемом случае механизм и кинетика деградационного процесса определен на основании знаний продукционной экспертной системы [2]:

ЕСЛИ значительные растягивающие напряжения ($\sigma_{\text{раст}} \leq 0,7\sigma_{0,2}$), в том числе остаточные, **И** чувствительный материал (деформация низколегированной стали в холодном состоянии величиной до 5%) **И** активная контактная среда (вода под давлением 3...4 МПа и температуре около 300°С), **ТО** механизм «локальная коррозия» (Коэффициент уверенности (КУ)=0,8) **ИЛИ** механизм «коррозионное растрескивание» (КУ=0,9);

ЕСЛИ механизм «коррозионное растрескивание», **ТО** поглощение в субмикрообъемах материала энергии остаточных напряжений и внешнего механического воздействия **И** повышение энергии кристаллической решетки до

критического уровня **И** деформация кристаллической решетки **И** разрыв межатомных связей.

Далее осуществляется переход на следующий информационный уровень (физический уровень) в подпространство «фиксируемых состояний», блок 1.2, где результатом моделирования являются параметры состояний на физическом уровне.

Параметры определены на основании следующих знаний:

ЕСЛИ кинетика «коррозионного растрескивания» на субмикроуровне, **ТО** линии и полосы скольжения (местоположение – на поверхности) **И** трещины (местоположение – на поверхности; длина < 100 мкм).

Аналогичные переходы осуществляются по всем информационным уровням, блоки 1.3, 1.4. Итогом моделирования является множество параметров, описывающих техническое состояние во всех аспектах (рис. 6, первый уровень дерева).

Затем для каждого момента моделирования осуществляется вычисление значений параметров по аналитическим зависимостям, выявленным на предыдущем этапе, в частности, определяется длина макротрещины и момент времени, когда значение выйдет за пределы рассматриваемого пространства. Длина макротрещины в каждый момент модельного времени определяется по экспериментальной модели.

В особый момент, когда параметр длины трещины вышел за границу класса состояний, осуществляется переход в следующий класс, характеризующейся большей опасностью, то есть рассматриваются состояния процессов повреждения на микроуровне и все соответствующие им классы состояний (рис. 2, блоки 2.1-2.4). Далее процесс моделирования аналогичен. Результат моделирования – это дерево состояний (рис. 6), где каждая вершина дерева описывается множеством параметров и их значений в каждый модельный момент времени (рис. 7, 8).

В результате работы системы моделирования предложен набор управляющих действий для уникальных механических систем:

- обеспечить диагностирование теплообменных гнутых труб реактора один раз в 2,5 года;
- обеспечить контроль за наличием взрывопожароопасного газа в теплообменной среде.

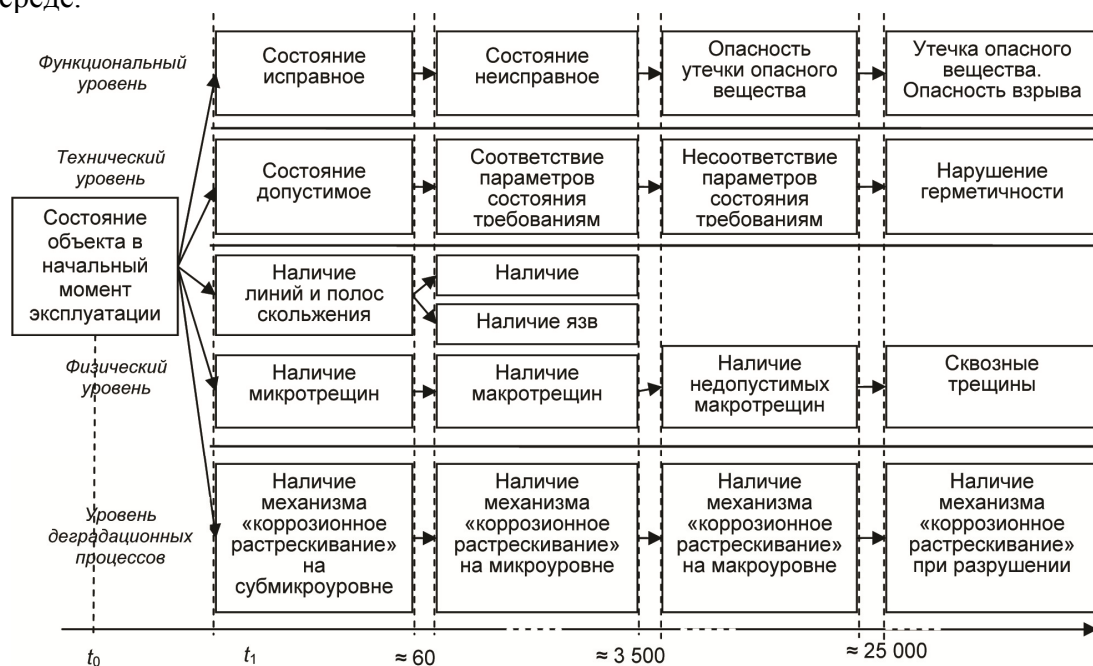


Рис. 6. Результаты моделирования в виде дерева состояний.

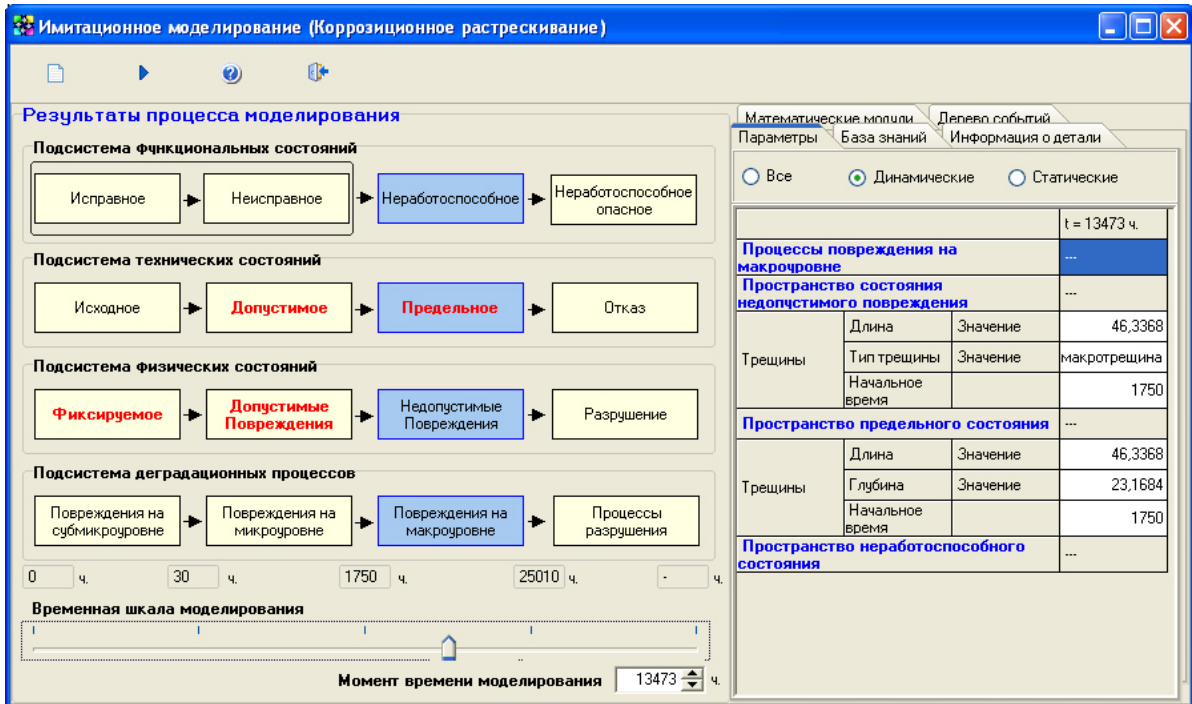


Рис. 7. Результаты моделирования. Параметры состояния детали в заданный момент моделирования.

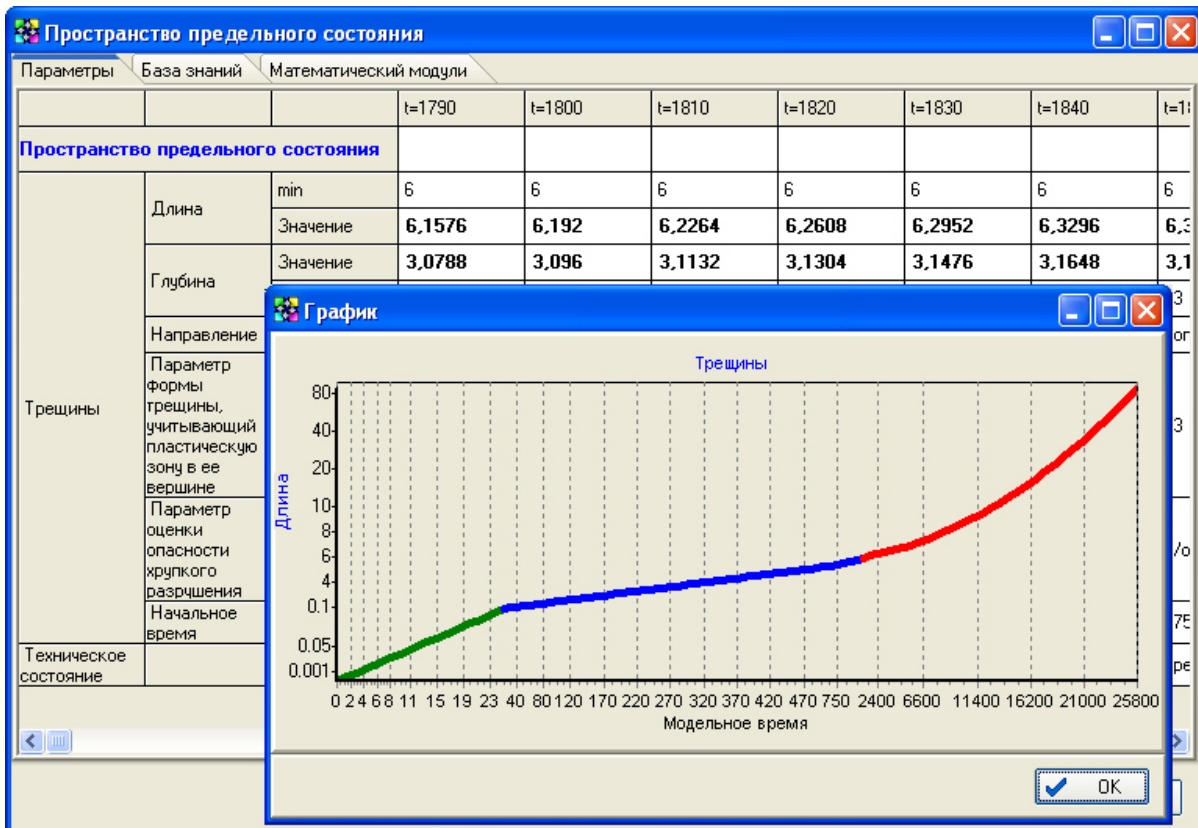


Рис. 8. Результаты моделирования. Параметры пространства предельного состояния и их значения в каждый момент моделирования.

4. Заключение

Представлен детерминированный подход к прогнозированию технического состояния. Отказ рассмотрен не как случайное событие, для которого осуществляется оценка вероятности наступления, а как процесс, обусловленный деградацией уникальных механических систем. Подробное описание данного процесса обеспечивает возможность получения более точных результатов прогнозирования динамики технического состояния.

Имитационное моделирование технического состояния механических систем необходимо использовать на этапе проектирования для выявления возможных деградационных процессов, обоснования наиболее подходящего материала и его структуры, формирования критериев предельного состояния, методов, средств и периодичности диагностирования. На этапе эксплуатации модель должна использоваться для определения остаточного ресурса и обоснования периодичности технического обслуживания и ремонта. Результаты имитационного моделирования могут быть использованы и для задач анализа и оценки риска аварийных ситуаций и аварий.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14-07-31298).

Список литературы

1. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 1. С. 14-22.
2. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 3. С. 48-57.
3. Николайчук О.А. Имитационное моделирование динамики технического состояния механических систем // Материалы VII ВСЕСИБИРСКОГО КОНГРЕССА ЖЕНЩИН-МАТЕМАТИКОВ. Красноярск, 2-4 октября 2012 г. Красноярск: изд-во Сибирского федерального университета, 2012.
4. Борщев А. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. // Gpss.ru – сайт, посвященный проблемам имитационного моделирования. URL: <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>
5. Павлов А.И., Столбов А.Б. Разработка системы поддержки проектирования имитационных моделей сложных систем на основе декларативного метода описания агентов // Сборник докладов шестой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013. Казань: Издательство «ФЭН» Академии наук Республики Татарстан, 2013. Т. 1. С. 267-270.
6. Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю. Компонентный подход: модуль продукционной экспертной системы. // Тр. Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы» AIS '2008 и «Интеллектуальные САПР» CAD '2008). Дивноморское, 2008. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 3-7.
7. Павлов А.И., Юрин А.Ю. Компонентный подход: модуль правдоподобного вывода по прецедентам // Программные продукты и системы. 2008. № 3. С. 55-58.
8. Николайчук О.А. Информационная технология имитационного моделирования для исследования динамики технического состояния сложных объектов // Труды третьей Международной конференции «Системный анализ и информационные технологии» САИТ-2009. Звенигород, 14-18 сентября 2009 г. М.: ИСА РАН, 2009. С. 324-328.