

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗНАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

О.А. Николайчук

Разработаны модели представления знаний и показано дальнейшее применение этих моделей для решения задач генезиса, прогнозирования и принятия решений при исследовании динамики технического состояния уникальных объектов. В результате комбинирования прецедентного, продукционного и математических методов получена гибридная модель представления знаний. На основе данного гибридного представления предложен алгоритм обработки знаний.

**Ключевые слова:** модели представления знаний, прецедент, продукция, обработка знаний, уникальная механическая система.

## ВВЕДЕНИЕ

Возможность повышения эффективности использования знаний при решении исследовательских задач связана с развитием моделей представления и процессов извлечения, приобретения, формирования знаний. Данная статья посвящена совершенствованию моделей представления знаний в целях обеспечения возможности учета типа решаемой задачи и снижения, благодаря этому, времени на извлечение и обработку знаний в любой предметной области. Такие модели могут стать основой для дальнейшего развития интеллектуальных систем, в частности, систем накопления знаний и адаптивных компьютерных систем, функционирование которых не зависит от модели предметной области и др.

Модели представления знаний создаются на основе объектно-ориентированного подхода и прецедентного, продукционного и математического методов моделирования.

Объект, как основной элемент объектно-ориентированного подхода, моделирует часть окружающей действительности, что хорошо понимается экспертами, а затем реализуется посредством объектно-ориентированных программных средств. Понимание существа разрабатываемой модели позволяет экспертам принимать активное участие в моделировании предметной области, что значительно повышает качество и адекватность моде-

лей. Считается, что объектно-ориентированный подход дает наиболее эффективную возможность создавать программные системы, использующие знания, в условиях экспоненциального роста их сложности.

Прецедентный метод [1, 2] позволяет использовать опыт в некоторой предметной области, т. е. частное знание, которое было приобретено (оценено и сохранено) субъектом в процессе решения проблемы; зачастую его называют конкретным, фактическим знанием или фактом.

Продукционный метод [1] применяется для реализации рассуждений на основе модели, отражающей процессы, явления и события, происходящие на исследуемом объекте.

Математические модели представляют собой знание предметной области, представленное в виде аналитических зависимостей.

Сочетание перечисленных методов призвано компенсировать недостатки их отдельного применения [3]. Прецедентный метод позволяет получить правдоподобное решение без трудоемкого и тщательного анализа предметной области, но при наличии достаточного объема опытных данных, представленных в виде прецедентов. Продукционный метод позволяет получить достоверное решение и может быть задействован при отсутствии опытных данных, но требует наличия информации о зависимостях между предметными сущностями, процессами, явлениями, представленных в виде продукционных правил. Математический метод



обеспечивает получение точных решений при соответствующей формализации предметной области.

В данной статье предложены модели прецедентного и продукционного представления знаний, а также их гибридного представления совместно с математическими моделями, для решения задач генезиса, прогнозирования и принятия решений. Рассмотрены алгоритм гибридного метода, использующего данные представления, и пример, демонстрирующий его работу.

Примеры использования предложенных моделей основаны на знаниях, отражающих динамику технического состояния опасных уникальных объектов [4]. Подобные объекты изготавливаются в единичных экземплярах, подвергаются экстремальным воздействиям нагрузок и сред и представляют опасность для людей и окружающей среды. Такие объекты не могут быть испытаны в условиях, приближающихся к эксплуатационным, поэтому их надежность и безопасность обеспечиваются преимущественно посредством расчетно-экспериментальных и эвристических методов. К таким объектам относятся аппараты типа реакторов и колонн синтеза, котлы различного назначения, технологические трубопроводы, компрессоры и насосы высокого и сверхвысокого давления, применяемые в химической, нефтехимической и энергетической промышленности при давлениях и температурах, достигающих соответственно 320 МПа и 500 °С.

Моделирование знаний в данной предметной области необходимо для решения следующих исследовательских задач: определения причинно-следственного комплекса возникших (генезис) и возможных (прогнозирование) опасных ситуаций, идентификации, диагностирования и прогнозирования технического состояния объектов. Решение этих задач создает научную основу для управления техническим состоянием. Полное, на стадии создания, и своевременное, на стадии применения, определение и прогнозирование параметров технического состояния, обоснование и реализация методов выявления и интерпретации предвестников изменения технического состояния, а значит, устранение причин изменения технического состояния, позволит обосновать рациональную систему управления созданием и эксплуатацией уникальных объектов, а значит, реализовать необходимые мероприятия по обеспечению их безопасности. Отметим, что при исследовании уникальных объектов использование прецедентов, описывающих даже в некоторой степени отличающиеся события или состояния, что характерно для уникальных объектов, позволяет сократить число альтернатив для принятия решений.

Рассматриваемый подход можно применить и для оборудования массового производства, однако его эффективность требует доказательств, так как для таких объектов используются теории, базирующиеся на статистических данных и теории вероятности, что существенно снижает объемы используемых экспертных знаний.

## 1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛИ ЗНАНИЙ

Согласно классификации видов онтологий [5], предлагается моделирование знаний основывать на моделях как предметной (ПО), так и проблемной областей (ПрО) (рис. 1). В этом случае имеет место оптимизация (рационализация) соотношения представления и обработки информации, что обеспечивает их независимое развитие. Рассматриваемая предметная область представлена уникальными объектами (машины и аппараты) [3, 4, 6, 7], а проблемная область отражает задачи генезиса, прогнозирования и принятия решений.

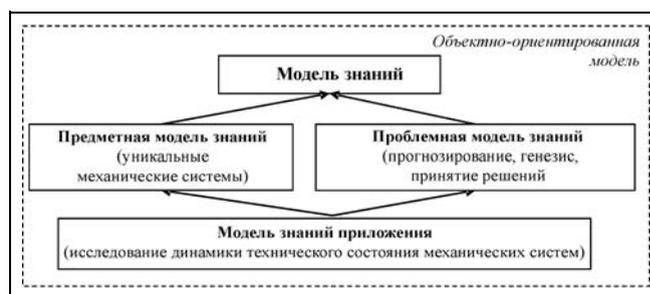


Рис. 1. Структура модели знаний

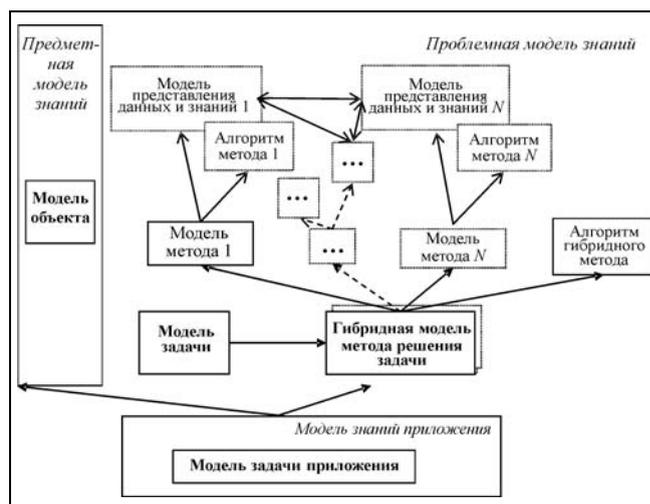


Рис. 2. Структура модели знаний, отражающая гибридность методов решения задач

Объектно-ориентированные модели предметной области включают в себя предметные сущности (классы и экземпляры классов) и отношения между ними. Модели проблемной области охватывают знания о способах решения разнообразных типов задач. При этом для эффективного решения каждой задачи требуется адекватное представление данных и знаний, а также алгоритмы, реализующие решение. Для обеспечения более полного использования и быстрого извлечения существующих знаний предлагается применять гибридный метод решения задач, который отражает сочетание различных методов решения, а, следовательно, различных типов моделей представления знаний (рис. 2).

Определим модели представления знаний для предметной и проблемной областей, а также для области приложения.

## 2. ПРЕДМЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

Объект предметной области представляем моделью:

$$\text{Объект} = (Св_1, \dots, Св_N), \quad (1)$$

где Объект — модель объекта;  $Св_j$  —  $j$ -е свойство объекта исследования; свойства могут иметь различную объектно-ориентированную структуру,  $j = \overline{1, N}$ .

Далее,  $Св_j = \langle \text{имя, значение, область знаний} \rangle$ , имя — наименование свойства, значение — значение свойства, область знаний — знания, которые позволяют определить значения свойства. Область знаний может включать в себя следующие данные и знания: принадлежащие пользователю (т. е. данные и знания вводятся пользователем); хранимые в базах данных (т. е. данные определяются в результате запроса к базе данных) и базах знаний (т. е. знания определяются в результате работы машины вывода на определенной базе знаний); имеющиеся в библиотеках математических моделей (т. е. данные получают в результате вычислительных операций процедур (модулей)).

Подобное представление свойств объекта обеспечивает создание гибридной модели представления знаний, которая, в свою очередь, создает возможность использования гибридного метода решения задач предметной области.

## 3. ПРЕЦЕДЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ

Каждый прецедент включает в себя описание проблемы и ее решение, и обобщенная модель прецедента имеет следующий вид:  $\Pi = \langle \text{Пр}, \text{Р} \rangle$ ,

где  $\Pi$  — прецедент;  $\text{Пр}$  — описание представленной в прецеденте проблемы;  $\text{Р}$  — описание решения (методы и средства) проблемы. Под проблемой понимается наличие неизвестных свойств объекта исследования и необходимость их определения по известным свойствам, т. е.  $\text{Пр} = \langle \text{О}, \text{Ц} \rangle$ , где  $\text{О}$  — объект исследования (1);  $\text{Ц}$  — цель разрешения проблемы.

Исходя из условий (требований, ограничений) конкретной предметной области, необходимо развить эту обобщенную модель до модели прецедента выбранной предметной и/или проблемной областей, и/или модели прецедента приложения (см. рис. 1).

### 3.1. Прецедентная модель знаний проблемной области

Рассмотрим, какие ограничения на модель прецедента налагает проблемная область. Прецедентный метод в нашем случае позволяет получить решение комбинированных задач: генезиса и принятия решений или прогнозирования и принятия решений, причем предметное наполнение решения будет определяться целью разрешения проблемы.

$$\text{Пр}^{\text{ПрО}} = \langle \{ \text{О}_{1k_1} \}_{k_1=1}^{N_1}, \dots, \{ \text{О}_{nk_n} \}_{k_n=1}^{N_n}, \left\{ \text{Процесс}_p(Св_{j_1}, \dots, Св_{j_{N_{\text{Процесс}}}}) \right\}_{p=1}^P, \text{Ц}(\text{Оц}(Св_{\text{Ц},1}, \dots, Св_{\text{Ц},N})) \rangle, \quad (2)$$

где  $\text{Пр}^{\text{ПрО}}$  — описание проблемы прецедента в аспекте проблемной области;  $\{ \text{О}_{ik_i} \}_{k_i=1}^{N_i}$  —  $i$ -й класс состояний объекта. Информация о состояниях объекта, как статическая, так и динамическая, позволяет отразить динамику состояния объекта. Предлагается осуществить классификацию состояний объекта для повышения эффективности метода поиска решения по аналогии. В ряде случаев это позволяет достигнуть значительного повышения производительности программной реализации метода благодаря понижению мощности пространства прецедентов. Выбор основания для классификации зависит от предметной области, и в зависимости от основания классификация может быть многоуровневой;

$\text{О}_{it}(Св_{i1}, \dots, Св_{iN})$  — состояние объекта  $i$ -го класса в  $t$ -й момент времени описывается набором свойств  $Св_{i1}, \dots, Св_{iN}$ ,  $t = \overline{0, T}$ ,  $\sum_{i=1}^n N_i = T$ ;



$$\left\{ \text{Процесс}_p(C_{V_{j_1}}, \dots, C_{V_{j_{N_{\text{Процесс}}}}}) \right\}_{p=1}^P \quad \text{— класс}$$

процессов, протекающих на объекте,  $N_{\text{Процесс}}$  — число свойств, определяющих процесс (процесс определяется некоторым набором свойств объекта). В данном классе необходимо описывать процессы, наиболее значимые для решения поставленных задач. Он необходим для применения методов частичной прецедентности решения и понижения неопределенности решения задач проблемной области.

Цель решения проблемы  $\Pi(O_{\Pi}(C_{V_{\Pi,1}}, \dots, C_{V_{\Pi,N}}))$  определяется достижением некоторого «целевого» состояния объекта  $O_{\Pi}(C_{V_{\Pi,1}}, \dots, C_{V_{\Pi,N}})$ .

Структура прецедента, в частности, его часть, описывающая решение, должна учитывать специфику задач принятия решений. Принятие решений включает в себя формулирование и сопоставление альтернатив, выбор, построение и корректировку гипотезы, таким образом:

$$P^{\text{ПрО}} = \langle \{P_{1k_1}, K_{p_1}\}_{k_1=1}^{M_1}, \dots, \{P_{sk_s}, K_{p_s}\}_{k_s=1}^{M_s} \rangle, \\ \sum_{s=1}^S M_s = M,$$

где  $P^{\text{ПрО}}$  — модель решения, определяемая проблемной областью;  $\{P_{sk_s}, K_{p_s}\}_{k_s=1}^{M_s}$  —  $s$ -й класс решений по критерию  $K_{p_s}$ ;  $P_m$  — возможное решение поставленной проблемы в виде объектно-ориентированной структуры (набор альтернатив),  $m = \overline{1, M}$ . Выбор основания для классификации решений зависит от предметной области. При использовании вывода по аналогии возможно получение решения (альтернативы или альтернатив), не удовлетворяющего требованиям пользователя в соответствии с критерием оценивания. Наличие классов решений позволяет определить другие альтернативы, принадлежащие классу полученного решения, которые могут удовлетворить пользователя.

На основе структуры изучаемого объекта формируется разбиение полного пространства прецедентов на подпространства:

$$\Pi^{\text{ПО}} = \Pi^{\text{ПО}}(O) = \sum_{\text{Стр}} \Pi(O_{\text{Стр}}),$$

где  $\Pi^{\text{ПО}}$  — пространство прецедентов предметной области;  $O_{\text{Стр}}$  — подсистема или структурный элемент объекта;  $\Pi(O_{\text{Стр}})$  — прецедент структурного элемента объекта.

### 3.2. Прецедентная модель знаний приложения

На основе предложенной модели прецедента далее рассмотрим компоненты модели прецедента приложения. Объектом предметной области исследования динамики технического состояния является механическая система (машины и аппараты), модель которой включает в себя такие свойства, как технические характеристики, технические требования, критерии предельного состояния, ремонтпригодность, мероприятия по обслуживанию и ремонту и др. Данные свойства образуют набор, посредством которого описывается статическое состояние объекта исследования.

Динамика технического состояния должна рассматриваться в течение всего «жизненного цикла» механической системы: от этапа проектирования до этапа утилизации. В связи с этим классификация состояний имеет два основания: в соответствии с этапами «жизненного цикла» — проектирование, изготовление, испытание, эксплуатация и утилизация и в соответствии со степенью опасности (или нежелательности) состояния на стадии эксплуатации: дефект, повреждение, разрушение, критический отказ.

С учетом предложенных ограничений проблемной (2) и предметной областей прецедент приложения «исследование динамики технического состояния уникальных механических систем» имеет вид, представленный коротежем:

$$\Pi^{\text{УМС}} = \langle \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Пр}}}^{\text{Пр}} \right\}_{k_{\text{Пр}}=1}^{N_{\text{Пр}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{ИЗ}}}^{\text{ИЗ}} \right\}_{k_{\text{ИЗ}}=1}^{N_{\text{ИЗ}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Ис}}}^{\text{Ис}} \right\}_{k_{\text{Ис}}=1}^{N_{\text{Ис}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Деф}}}^{\text{Деф}} \right\}_{k_{\text{Деф}}=1}^{N_{\text{Деф}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{П}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{П}}=1}^{N_{\text{П}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Р}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{Р}}=1}^{N_{\text{Р}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{От}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{От}}=1}^{N_{\text{От}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{УТ}}}^{\text{УТ}} \right\}_{k_{\text{УТ}}=1}^{N_{\text{УТ}}}, \{ \text{НП}_s \}_{s=1}^S, \Pi, \\ \{ P_{\text{Пр}k_{\text{Пр}}}, K_{p_{\text{Пр}}}\}_{k_{\text{Пр}}=1}^{M_{\text{Пр}}}, \dots, \{ P_{\text{УТ}k_{\text{УТ}}}, K_{p_{\text{УТ}}}\}_{k_{\text{УТ}}=1}^{M_{\text{УТ}}} \rangle, \quad (3)$$

где  $\Pi^{\text{УМС}}$  — прецедент уникальной механической системы;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{Пр}}}^{\text{Пр}} \right\}_{k_{\text{Пр}}=1}^{N_{\text{Пр}}}$  — класс состояний при проектировании;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{ИЗ}}}^{\text{ИЗ}} \right\}_{k_{\text{ИЗ}}=1}^{N_{\text{ИЗ}}}$  — класс состоя-

ний при изготовлении;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{Ис}}}^{\text{Ис}} \right\}_{k_{\text{Ис}}=1}^{N_{\text{Ис}}}$  — класс со-

стояний при испытаниях;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{Деф}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{Деф}}=1}^{N_{\text{Деф}}}$  —

класс состояний дефекта при эксплуатации;

$\left\{ \text{МС}_{k_{\text{П}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{П}}=1}^{N_{\text{П}}}$  — класс состояний повреждений при

эксплуатации;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{Р}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{Р}}=1}^{N_{\text{Р}}}$  — класс состояний

разрушений при эксплуатации;  $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{От}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{От}}=1}^{N_{\text{От}}}$  —

класс состояний отказа при эксплуатации;

$\left\{ \text{МС}_{k_{\text{УТ}}}^{\text{УТ}} \right\}_{k_{\text{УТ}}=1}^{N_{\text{УТ}}}$  — класс состояний при утилизации;

$\{ \text{НП}_s \}_{s=1}^S$  — нежелательные процессы, протека-

ющие в процессе «жизненного цикла» механической системы, Ц — цель исследования (достижение состояния механической системы приемлемо-

го уровня надежности);  $\{ \text{Р}_{\text{Пр}k_{\text{Пр}}}, \text{Кр}_{\text{Пр}} \}_{k_{\text{Пр}}=1}^{M_{\text{Пр}}}$  —

класс решений на этапе проектирования;

$\{ \text{Р}_{\text{УТ}k_{\text{УТ}}}, \text{Кр}_{\text{УТ}} \}_{k_{\text{УТ}}=1}^{M_{\text{УТ}}}$  — класс решений на этапе ути-

лизации. Классы решений представляют собой перечень мероприятий, осуществление которых позволяет достигнуть целевого состояния. Критериями выбора возможных решений служит уровень надежности, который они обеспечивают, и стоимость мероприятий.

Механическая система представляет собой иерархический объект. Иерархия имеет следующую структуру: «деталь — сборочная единица — специфицированное изделие». Данная структура учитывается в модели прецедента путем разбиения полного пространства прецедентов на подпространства:

$$\Pi^{\text{ПО}} = \Pi^{\text{ПО}}(\text{О}) = \sum_{i_{\text{МС}}} \sum_{i_{\text{СЕ}}} \sum_{i_{\text{Д}}} \Pi(\text{О}_{i_{\text{МС}}i_{\text{СЕ}}i_{\text{Д}}}),$$

где  $i_{\text{Д}}$  — индекс деталей,  $i_{\text{СЕ}}$  — индекс сборочных единиц,  $i_{\text{МС}}$  — индекс специфицированных изделий.

Прецеденты, описанные в виде предложенной структуры, образуют базу прецедентов [7].

#### 4. ПРОДУКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ (РАССУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ)

На обобщенном уровне модель знаний в виде продукции имеет вид:

**если** <условие> **то** <действие>.

##### 4.1. Продукционная модель знаний проблемной области

Основываясь на модели предметной области и введенных в § 3 понятиях, уточняем вид продукции:

**если**  $\text{СВ}_{j_1}, \dots, \text{СВ}_{j_{N_j}}$  **то**  $\text{СВ}_{jj_1}, \dots, \text{СВ}_{jj_{N_j}}$ ,

где  $\text{СВ}_{j_1}, \dots, \text{СВ}_{j_{N_j}}, \text{СВ}_{jj_1}, \dots, \text{СВ}_{jj_{N_j}}$  — некоторые наборы свойств.

Исходя из требований проблемной области, выделяем следующие виды продукции:

**если**  $\text{О}_{it}(\text{СВ}_{t1}, \dots, \text{СВ}_{tN})$   
**то**  $\text{О}_{i(t+1)}(\text{СВ}_{(t+1)1}, \dots, \text{СВ}_{(t+1)N})$ ,  
и(или)

**если**  $\text{СВ}_{j_1}, \dots, \text{СВ}_{j_{N_j}}$  **или**  $\text{О}_{it}(\text{СВ}_{t1}, \dots, \text{СВ}_{tN})$   
**то**  $\text{Процесс}_p(\text{СВ}_{j_1}, \dots, \text{СВ}_{j_{N_{\text{Процесс}}}})$ ,

и(или)

**если**  $\text{О}_{it}(\text{СВ}_{t1}, \dots, \text{СВ}_{tN})$  **то**  $\text{Р}_m$ ,

где  $\text{О}_{it}(\text{СВ}_{t1}, \dots, \text{СВ}_{tN})$ ,  $\text{О}_{i(t+1)}(\text{СВ}_{(t+1)1}, \dots, \text{СВ}_{(t+1)N})$  — некоторые состояния объекта в моменты времени  $t$  и  $t+1$ ;  $\text{Процесс}_p(\text{СВ}_{j_1}, \dots, \text{СВ}_{j_{N_{\text{Процесс}}}})$  — некоторый процесс, протекающий на объекте;  $\text{Р}_m$  — некоторое решение, принятое исходя из цели поставленной задачи.

##### 4.2. Продукционная модель знаний приложения

Используя результаты моделирования предметной области, в частности, предложенную классификацию технических состояний объекта исследования (по этапам жизненного цикла и по степени опасности на стадии эксплуатации), определим модели продукции уровня приложения «исследование динамики технического состояния уникальных механических систем»:

$\text{Р}_{\text{Пр}}$ : **если**  $\text{МС}_{iik_i}$  **то**  $\text{МС}_{t+1i+1k_{i+1}}$ ,

где  $\text{Р}_{\text{Пр}}$  — имя класса продукции, описывающих причинно-следственные связи между состояниями



ми объекта;  $MC_{tik_i}$  — состояние объекта из  $i$ -го класса состояний в некоторый момент времени  $t$ ;  $MC_{(t+1)(i+1)k_{i+1}}$  — состояние объекта из  $(i+1)$ -го класса состояний в некоторый следующий момент времени  $t+1$ .

$$R_{НП}: \text{если } MC_{tik_i} \text{ то НП}_p,$$

где  $R_{НП}$  — имя класса продукций, описывающих нежелательные процессы;  $НП_p$  —  $p$ -й нежелательный процесс.

$$R_{НПР}: \text{если } MC_{t'ik_i}^{HC}$$

$$\text{то } \{P_{Прk_{Пр}}, Kp_{Пр}\}_{k_{Пр}=1}^{M_{Пр}}, \dots, \{P_{УТk_{УТ}}, Kp_{УТ}\}_{k_{УТ}=1}^{M_{УТ}},$$

где  $R_{НПР}$  — имя класса продукций, описывающих решения;  $MC_{t'ik_i}^{HC}$  — нежелательное состояние в некоторый момент  $t'$  в прошлом, являющееся причиной возникновения некоторого текущего состояния.

Классы продукций с учетом введенной классификации образуют базы знаний [7].

Моделирование опыта невозможно без использования математических моделей процессов, явлений и событий. Тип математической модели определяется требованиями проблемной области, ее идентификация осуществляется на основе предметной области, а принятие конкретного решения возможно только в рамках приложения.

В случае решения задачи исследования динамики технического состояния математический аппарат может быть использован для определения значений отдельных свойств при описании объекта исследования, включая его статическое и динамическое состояние. Например, при описании скорости развивающихся макротрещин, изменения твердости материала, изменения остаточных напряжений в детали и др.

### 5. ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ И МЕТОД ЕЕ ОБРАБОТКИ

Гибридное моделирование знаний основано на прецедентных, продукционных и математических моделях представления знаний. Порядок и способы сочетания моделей определяются исходя из особенностей предметной и проблемной областей. В частности, на основе математических моделей могут быть определены значения свойств, составляющих как элементы прецедентной, так и продукционной моделей, в свою очередь продукционные модели могут быть использованы для оп-

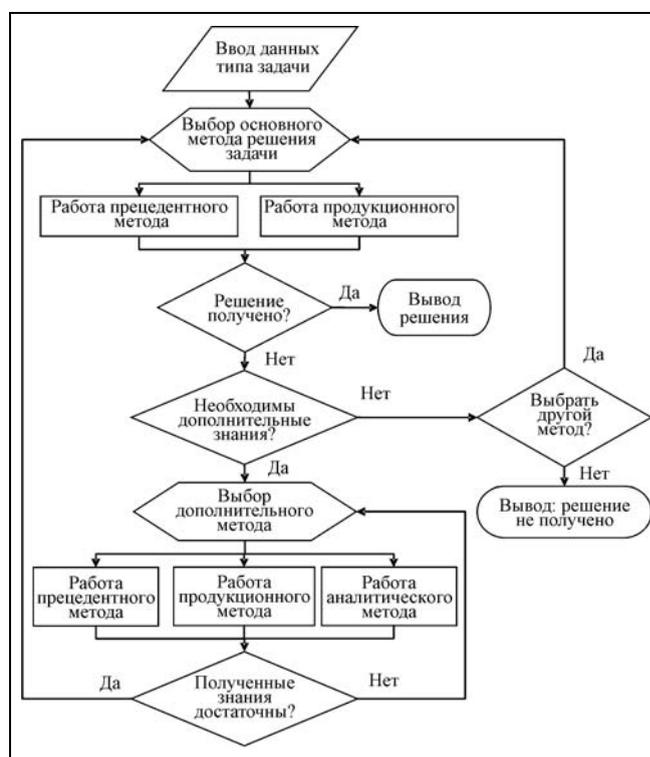


Рис. 3. Алгоритм взаимодействия методов

ределения значений свойств или при адаптации решений, полученных по аналогии:

$$MЗ = \langle П, \text{Продукция}, М, F_{ПМ}, F_{\text{Продукция}М}, F_{\text{Продукция}П} \rangle,$$

где  $MЗ$  — модель знаний,  $П$  — прецедентная модель,  $Продукция$  — продукционная модель,  $М$  — математическая модель,  $F_{ПМ}: П \rightarrow М$  — множество отношений между прецедентами и математическими моделями,  $F_{\text{Продукция}М}: \text{Продукция} \rightarrow М$  — множество отношений между продуктами и математическими моделями,  $F_{\text{Продукция}П}: П \rightarrow \text{Продукция}$  — множество отношений между продуктами и прецедентами.

Отношения  $F_{ПМ}, F_{\text{Продукция}М}, F_{\text{Продукция}П}$  обеспечиваются на основе информации, содержащейся в описании свойств объекта предметной области (1).

Гибридный алгоритм взаимодействия рассматриваемых методов приведен на рис. 3.

Для описания взаимодействия методов введены понятия «основного метода» и «дополнительного метода». Под основным методом понимается метод, с помощью которого может быть получено решение поставленной задачи. Дополнительный метод — это метод, который применяется для получения дополнительных данных и знаний, необ-

ходимых для решения поставленной задачи. Сначала выбирается основной метод решения задачи и на основе входных данных осуществляется работа данного метода, в результате которой решение может быть получено или не получено. В последнем случае либо получают дополнительные знания с помощью дополнительных методов для повторного применения выбранного метода, либо выбирают другой метод решения задачи.

## 6. ПРИМЕР

Рассмотрим взаимодействие моделей для решения задачи прогнозирования состояния уникальной механической системы. Объектом исследования является подводящий технологический трубопровод под колонной синтеза аммиака. Выделим основные свойства объекта, на основе которых решается задача, т. е. элементы множества, описывающие исходное состояние объекта  $MC_0(S_{V_{01}}, \dots, S_{V_{0N}})$ :

- свойства объекта исследования: объект изготовлен из углеродистой стали ( $S_{V_{01}}$ ); имеются сварные монтажные швы ( $S_{V_{02}}$ ); обеспечивается герметичность элементов ( $S_{V_{03}}$ ); трубопровод предназначен для транспортировки пожаровзрывоопасной рабочей среды ( $S_{V_{04}}$ ) и др.;
- воздействующие факторы: высокое внутреннее давление; высокая температура ( $S_{V_{05}}$ ); вибрация ( $S_{V_{06}}$ ) и др.;
- свойства системы прочностной надежности: запасы прочности ( $S_{V_{07}}$ ); запасы ресурса ( $S_{V_{08}}$ ); периодическое диагностирование ( $S_{V_{09}}$ ) и др.

Для примера опишем только первый класс состояний — класс дефектности и последний класс состояний — класс отказов (в дальнейшем заменим индексы в выражении (3): Деф на 1, От на 4).

- Класс дефектности  $\left\{ MC_{1k_1}^{\ominus} \right\}_{k_1=1}^{N_1}$ . Состояние

$MC_{1k_1}^{\ominus}(\dots, S_{V_{k_12}}, \dots, S_{V_{k_1sd}}, \dots)$ , принадлежащее этому классу, описывается объектными свойствами, например:  $S_{V_{k_12}}(s_{v_{k_121}} \leq 3 \text{ мм}, \dots)$  — свойство, описывающее сварные монтажные швы, где  $s_{v_{k_121}}$  — допускаемая высота валика шва;  $S_{V_{k_1sd}}(s_{v_{k_1sd1}} \leq 5 \text{ мм}^2, s_{v_{k_1sd2}} \leq 2 \text{ мм}^2, \dots)$  — свойство, описывающее дефект сварки, где  $s_{v_{k_1sd1}}$  — допускаемая эквивалентная площадь дефекта,  $s_{v_{k_1sd2}}$  — допускаемая длина дефекта.

- Класс отказов,  $\left\{ MC_{4k_4}^{\ominus} \right\}_{k_4=1}^{N_4}$ . Состояние

$MC_{4k_4}^{\ominus}(\dots, S_{V_{k_4so}}, \dots)$ , принадлежащее этому классу, описывается свойствами, например:  $S_{V_{k_4so}}(s_{v_{k_4so1}} \leq 1 \text{ л/ч}, \dots)$  — свойство, описывающее параметры разгерметизации неразъемных соединений, где  $s_{v_{k_4so1}}$  характеризует допустимость разгерметизации неразъемных соединений не более 1 л/ч.

Среди деградиционных процессов, происходящих на объекте, можно выделить следующие:  $НП_1$  — многоцикловая усталость;  $НП_2$  — коррозионное растрескивание.

Цель Ц исследования заключается в достижении состоянием механической системы приемлемого уровня прочностной надежности и безопасности, т. е. «целевого» состояния  $O_{\text{Ц}}(\dots, S_{V_{\text{Ц}7}}, \dots)$ , где свойство  $S_{V_{\text{Ц}7}}(s_{v_{\text{Ц}71}} = 25 \text{ МПа}, \dots)$  описывает циклическую прочность при многоцикловых нагрузках,  $s_{v_{\text{Ц}71}}$  — предел выносливости при симметричном цикле нагружения.

На стадии проектирования рассмотрим ситуацию, когда на объекте, на стадии изготовления, может быть пропущен недопустимый дефект сварки: площадь дефекта  $s_{v_{k_1sd1}} \geq 5 \text{ мм}^2$  и длина дефекта  $s_{v_{k_1sd2}} \geq 2 \text{ мм}$ . Необходимо решить задачу прогнозирования состояния объекта с таким дефектом при воздействии вибрации.

Допустим, в качестве основного метода выбран прецедентный метод. Информация, описывающая свойства исходного состояния, может быть получена в результате ввода данных пользователем или из базы данных. Тогда алгоритм решения задачи состоит в следующем.

*Шаг 1.* На основе известных свойств объекта определяется множество состояний объекта, т. е. состояний, где обнаружен подобный недопустимый дефект и имеет место какой-то деградиционный процесс. На основе анализа близости аналогов (подобных состояний) определяется вид деградиционного (нежелательного) процесса, протекающего на исследуемом объекте. В нашем случае определен деградиционный процесс:  $НП_1$ (имя  $НП$ , ...  $S_{V_{j_{НП}}}, S_{V_{(j+1)_{НП}}}, \dots)$ , где имя  $НП$  — имя деградиционного процесса, многоцикловая усталость;  $S_{V_{j_{НП}}}(s_{v_{j_{НП}1}}, \dots, s_{v_{j_{НП}N_{НП}}})$  — свойство, описывающее кинетику деградиционного процесса (совокупность событий, описывающих опасные про-



цессы и явления);  $св_{j_{\text{НП}}\text{пр}}$  (имя события, содержание события,  $БЗ_{\text{ДП}}$ ) — свойство, описывающее событие,  $\text{пр} = \overline{1, N_{\text{НП}}}$ ,  $БЗ_{\text{ДП}}$  — база знаний деградационных процессов, на основе которой можно получить знания о кинетике этого процесса;  $Св_{(j+1)_{\text{НП}}}$  — свойство, описывающее признаки деградационного процесса;  $св_{(j+1)_{\text{НП}}\text{пр}}$  (имя признака, содержание признака,  $БЗ_{\text{ДП}}$ ) — свойство, описывающее признак.

В случае, если в аналогах отсутствует информация о некоторых свойствах деградационного процесса, необходимо их определить для получения более точного решения задачи. Предполагаем, что признаки в нашем примере неизвестны.

**Шаг 2.** На основе известных свойств объекта и вида деградационного процесса определяются признаки деградационного процесса с помощью продукционного метода и базы знаний  $БЗ_{\text{ДП}}$ . В частности, при многоциклового усталости зарождаются и развиваются трещины, опасность которых характеризуется величиной  $K_1$ . Поэтому среди применяемых правил используется следующее:

**если**  $Св_{j_{\text{НП}}}$  ((Коэффициент интенсивности напряжений  $K_1$ ; значение неизвестно; Процедура  $K_1$ )  $\geq$   $\geq$  (Вязкость разрушения материала в вершине макротрещины,  $K_{1C}$ ; значение неизвестно;  $БД_{\text{М}}$ ), ...) **то**  $Св_{(j+1)_{\text{НП}}}$  (Разрушение (вид — «хрупкое», ...), ...).

Для соблюдения этого правила необходимо вычислить с помощью процедуры Процедура  $K_1$  значение переменной  $K_1$  и выполнить запрос к базе данных материалов  $БД_{\text{М}}$  для определения значения  $K_{1C}$ .

**Шаг 3.** Значения переменной  $K_1$  определяется с помощью математического метода и возвращается продукционному методу.

**Шаг 4.** Далее, с помощью выбранного продукционного правила определяются признаки деградационного процесса (Разрушение (вид — «хрупкое», ...)). Результаты передаются в прецедентный метод.

**Шаг 5.** На основе полученной информации о значениях свойств описывающих деградационный процесс решается задача прогнозирования состояния с помощью прецедентного метода.

В результате взаимодействия методов получаем решение — прогнозируемые варианты динамики технического состояния трубопровода:

— хрупкое разрушение с фактором уверенности 0,9;

— дальнейший рост сквозной трещины с фактором уверенности 0,1.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные модели и алгоритмы сочетают преимущества различных подходов. Они позволяют развить свойства интеллектуальных систем, обеспечивающих возможности поддержки процесса извлечения знаний экспертом, создать автоматизированный метод приобретения и формирования релевантной модели знаний и эффективные алгоритмы обработки знаний.

Результаты моделирования знаний были использованы для реализации информационно-логико-математической модели в системе имитационного моделирования технического состояния уникальных машин и аппаратов [6], а также в интеллектуальных программных системах для определения причин отказов и аварий [3, 7].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Льюгер Джордж Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. — М.: Вильямс, 2003.
2. Aamodt A., Plaza E. Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. — 1994. — Vol. 7, N 1. — P. 39—59.
3. Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем // Искусственный интеллект. — 2006. — № 4. — С. 459—468.
4. Берман А.Ф. Деградация механических систем. — Новосибирск: Наука, 1998. — 320 с.
5. Handbook on Ontologies / Staab Steffen eds. — Heidelberg: Springer — Verlag, 2004.
6. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2007. — № 1. — С. 14—22.
7. Nikolaychuk O.A., Yurin A.Y. Computer-Aided Identification of Mechanical System's Technical State With the Aid of Case-Based Reasoning // Expert Systems With Applications. — 2008. — Vol. 34. — P. 635—642.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.Н. Васильевым.

**Николайчук Ольга Анатольевна** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск, ☎(3952) 45-31-52, ✉ nikoly@icc.ru.