



# OSTIS-2016

(Open Semantic Technologies for Intelligent Systems)

УДК 007:519.816

## О ФОРМАЛИЗАЦИИ ТЕМПОРАЛЬНЫХ РАССУЖДЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Вагин В.Н. \*, Еремеев А.П. \*, Гулякина Н.А. \*\*

*\*Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия*

**vagin@appmat.ru, eremeev@appmat.ru**

*\*\*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*  
**guliakina@bsuir.by**

Рассматриваются возможности формализации рассуждений (вывода) с учетом фактора времени в плане их использования в современных и перспективных интеллектуальных системах различного назначения, включая системы реального времени. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, темпоральный вывод, прецедент, сеть Петри, дерево решений, моделирование, технология OSTIS.

### Введение

Современные интеллектуальные системы, (ИС) особенно системы реального времени, типичными представителями которых являются ИС поддержки принятия решений реального времени (ИСППР РВ), относятся к классу сложных динамических систем, реализуемых структурно и функционально на основе парадигмы семиотической системы [Вагин и др., 2001; 2015].

Формально ИС (ИС РВ) *семиотического типа* может быть задана набором [Вагин и др., 2015]:

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle,$$

где  $M = \{M_1, \dots, M_n\}$  – множество формальных или логико-лингвистических моделей, реализующих определенные как чисто вычислительные (например, решение задачи математической оптимизации), так и интеллектуальные функции (например, моделирование правдоподобных рассуждений на основе экспертных знаний);

$R(M)$  – правила выбора необходимой модели или совокупности моделей в текущей ситуации, т.е. правила, реализующие отображение

$$R(M): S \rightarrow M,$$

где  $S$  – множество возможных ситуаций (состояний), которое может быть и открытым, или

$S' \rightarrow M$ , где  $S'$  – некоторое множество обобщенных ситуаций (состояний), например, нормальных (штатных), аномальных или аварийных, при попадании в которые происходит смена модели;

$F(M) = \{F(M_1), \dots, F(M_n)\}$  – множество правил модификации моделей  $M_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Каждое правило  $F(M_i)$  реализует отображение

$$F(M_i): S'' \times M_i \rightarrow M'_i,$$

где  $S'' \subseteq S$ ,  $M'_i$  – некоторая модификация модели  $M_i$ ;

$F(SS)$  – правило модификации собственно системы  $SS$ , ее базовых конструкций  $M$ ,  $R(M)$ ,  $F(M)$  и при необходимости самого правила  $F(SS)$ , т.е.  $F(SS)$  реализует целый ряд отображений (или комплексное отображение)

$$F(SS): S''' \times M \rightarrow M', S''' \times R(M) \rightarrow R'(M),$$

$$S''' \times F(M) \rightarrow F'(M),$$

$$S''' \times F(SS) \rightarrow F'(SS),$$

где  $S''' \subseteq S$ ,  $S''' \cap S' = \emptyset$ ,  $S''' \cap S'' = \emptyset$ , т.е. правила модификации данного типа применяются в ситуациях, когда имеющихся множеств моделей, правил выбора и правил модификации недостаточно для вывода (поиска решения). Причем для модификации  $F(SS)$  могут быть использованы как внутренние средства порождения моделей и правил (гипотез), так и внешние.

Известно, что в ИС РВ, как в сложной динамической системе, необходимо наличие развитых средств представления фактора времени и моделирования временных (темпоральных) зависимостей как при представлении данных и знаний, так и при моделировании рассуждений, содержащих фактор времени (темпоральных рассуждений) [Еремеев и др., 2003; 2010; 2015а; 2015б]. В данной работе рассматривается ряд

методов и моделей в контексте формализации темпоральных зависимостей и темпорального вывода в ИС РВ.

## 1. Формализация рассуждений на основе темпоральных прецедентов

При поиске решения плохо формализованных задач, специфичных для ИС РВ типа ИСППР РВ, возникает необходимость применения методов правдоподобных рассуждений (вывода), позволяющих найти приемлемое решение в заданных временных ограничениях. Один из таких методов базируется на том факте, что человеку свойственно при решении новой, неизвестной задачи попытаться в первую очередь использовать решения, которые принимались ранее в подобных (аналогичных) случаях и при необходимости адаптировать их к рассматриваемому. Данный подход лег в основу методов рассуждений на основе аналогий и прецедентов (Case-Based Reasoning, CBR) [Еремеев и др, 2010; Montani et al., 2013].

Данные методы достаточно хорошо проработаны и используются на практике в ИС различного назначения, однако во многих случаях при выводе используются «мгновенные» снимки ситуаций (параметров), а история их изменения не учитывается. Но природа физических процессов такова (что специфично для динамических систем типа ИС РВ), что к одному и тому же значению ключевых параметров контролируемый процесс может перейти разными путями, от которых зависит дальнейшая динамика их изменения. Поэтому остро встает вопрос о разработке новых методов и средств моделирования рассуждений с учетом фактора времени, т.е. темпоральных рассуждений.

Рассмотрим темпоральное расширение метода рассуждений на основе прецедентов (на примере метода ближайшего соседа) возможностью учета поведения контролируемого объекта во времени [Куриленко и др., 2009]. При учете фактора времени появляется возможность проанализировать проблемную ситуацию более глубоко в динамике, а также отследить процесс изменения значений ключевых параметров.

Наиболее простым способом адаптации существующих алгоритмов вывода на основе прецедентов к учету фактора времени является подмена «мгновенного» снимка ключевых параметров «историей» их изменения. Эта история может быть представлена в виде матрицы значений, составленной на определенный период наблюдения с определенным интервалом (тактом). Далее для реализации вывода матрица преобразуется в вектор путем последовательной записи в него элементов ее столбцов. Таким образом, в прецедент включаются не только значения параметров в текущий момент времени, но и их значения за некоторый период времени до этого. При этом эксперту (лицу, принимающему решения, ЛПР) может представляться более удобная для интерпретации и заполнения матричная форма, а ее преобразование в

массив для применения того или иного CBR-метода ИС РВ может выполняться автоматически.

Другой способ введения фактора времени в процесс рассуждений основывается на учете решений, полученных на прошлых этапах при выборе решения на текущем этапе. Проиллюстрируем его на примере расширения метода ближайшего соседа. В первую очередь следует определить отрезок времени для анализа проблемной ситуации (т.е. глубину анализа). Далее рассматриваемый промежуток времени разбивается на  $N$  равных отрезков с некоторым шагом (тактом).

В сформированной базе прецедентов, где каждый прецедент представляется в параметризованном виде [Варшавский и др, 2009]

$$\text{CASE} = (x_1, x_2, \dots, x_n, R),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры ситуации, описывающей данный прецедент;  $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$ , где  $n$  – количество параметров для описания прецедента, а  $X_1, \dots, X_n$  – области допустимых значений соответствующих параметров,  $R$  – решение (диагноз, рекомендации ЛПР), происходит сравнение значений параметров ситуации в каждый момент времени  $i$ , где  $i = 0, 1, \dots, N$ .

Значения параметров прецедентов сравниваются между собой по методу ближайшего соседа с выбранной метрикой (например, Евклидовой). Для всех моментов  $i$  получаются варианты прецедентов с определенными интегральными оценками, которые могут быть выбраны как соответствующие ситуации в этой точке для текущего значения порога подобия. На следующем этапе по интегральным оценкам в моментах  $i$  выбирается наиболее вероятный прецедент или группа прецедентов, удовлетворяющих поисковому условию. Каждому результирующему прецеденту в соответствие ставится выбранная мера сходства, которая может, в частности, задаваться правилом: «При совпадении всех параметров в описании прецедента и текущей ситуации степень сходства равна 1, а каждый совпавший параметр дает вклад равный  $1/n$ , где  $n$  – число параметров в описании прецедента и текущей ситуации». Отметим, что, используя значения параметров в точках  $i$ , можно с помощью интерполяции построить прогноз развития проблемной ситуации.

На результат поиска прецедентов, удовлетворяющих проблемной ситуации, оказывает влияние несколько факторов. Во-первых, это выбор метрики. В каждом конкретном случае выбор производится по-разному, в зависимости от целей ЛПР, физической и статистической природы используемой при управлении сложным объектом информации, а также других ограничений и факторов, влияющих на процесс поиска решения. Во-вторых, влияние оказывает выбор шага, с которым разбивается на промежутки рассматриваемый отрезок времени. Вариация размеров шага дает различное количество дискретных точек, по которым происходит

сравнение значений параметров прецедентов. Это оказывает влияние не только на точность выбора прецедента, но и на скорость выполнения поискового алгоритма, а также на величину погрешности, с которой может быть построен прогноз. И, в-третьих, важным фактором оказывается выбор порогового значения, определяющего степень схождения.

Предложенные подходы могут быть использованы как по отдельности, так и в комбинации друг с другом. В практических приложениях важно правильно (адекватно) определить величину  $N$  и размер такта.

Изложенный метод на основе темпоральных прецедентов можно развить и улучшить в плане применения в ИС РВ. Очевидное улучшение – переход к моделям, позволяющим хранить меньший объем информации и допускающих рассуждения с использованием как метрических, так и качественных темпоральных зависимостей на основе темпоральной версии задачи согласования ограничений [Еремеев и др, 2010].

Определим метрическую точечную задачу согласования темпоральных ограничений (МЗСТО) как  $Z=(V,D,C)$ , где  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  – конечное множество темпоральных переменных, соответствующих моментам времени;  $D$  – область значений темпоральных переменных (является множеством вещественных или целых чисел);  $C$  – конечное число бинарных темпоральных ограничений вида  $C_{ij} = \{[a_1, b_1], \dots, [a_k, b_k]\}$ , где интервалы попарно не пересекаются. Бинарные ограничения позволяют определить разрешенную дистанцию между моментами времени и интерпретируются как  $(a_1 \leq V_j - V_i \leq b_1) \cup \dots \cup (a_k \leq V_j - V_i \leq b_k)$ . Для решения МЗСТО требуется скорректировать все ограничения так, чтобы они не противоречили друг другу. Если подобная корректировка возможна, то МЗСТО считается согласованной (иначе – несогласованной).

Используем формализм МЗСВО для описания наблюдаемых ситуаций и прецедентов. При этом фиксируется как сам факт наступления тех или иных событий, их порядок, так и время их появления (метрика).

Далее будем предполагать, что МЗСТО согласованы и преобразованы в минимальный вид. Для вычисления соответствия наблюдаемой ситуации и прецедента могут быть применены как метод с жесткими, так и метод с мягкими темпоральными ограничениями.

Метод с жесткими ограничениями предполагает точное соответствие наблюдаемых событий и событий, имеющих в прецеденте, а также для каждого метрического ограничения  $C_{ij}$  в прецеденте и ограничения  $C^*_{ij}$  в наблюдаемой ситуации должны выполняться условия  $C_{ij} \cap C^*_{ij} = C_{ij}$ . При этом для того, чтобы события в прецеденте и анализируемой ситуации соответствовали друг другу, предлагается использовать для их нумерации числа, получаемые

в результате сортировки по имени параметра и времени.

Среди достоинств данного метода – высокая скорость вывода и высокая точность результата. Метод полезен для систем, в которых временные характеристики протекающих процессов (время наступления событий и их порядок) достаточно стабильны. Однако для рассматриваемой МЗСТО в целом он подходит лишь частично в виду достаточно сильной жесткости условий.

Так называемый «мягкий» метод может рассматриваться в трех вариантах: 1) условие  $C_{ij} \cap C^*_{ij} = C_{ij}$  заменяется на пару  $C_{ij} \cap C^*_{ij} \neq \emptyset$  и  $C^*_{ij} \subseteq C_{ij}$ ; 2) условие  $C_{ij} \cap C^*_{ij} = C_{ij}$  заменяется на  $C_{ij} \cap C^*_{ij} \neq \emptyset$ ; 3) условие  $C_{ij} \cap C^*_{ij} = C_{ij}$  заменяется на условие близости границ в ограничениях:  $|\text{lo}(C_{ij}) - \text{lo}(C^*_{ij})| < \varepsilon \wedge |\text{hi}(C_{ij}) - \text{hi}(C^*_{ij})| < \varepsilon$ .

Дальнейшее смягчение условий возможно при анализе степени схождения с учетом изменения истории изменений каждого параметра по отдельности. Тут возможны разные стратегии (например, учитывающие ограничения между событиями изменения значений разных параметров с большим весом, чем ограничения, наложенные на события полученные из-за изменения одного параметра и т.п.).

Вычисление прецедента на основе выборки похожих ситуаций (обучение) в данном случае может быть выполнено на основе смягчения ограничений  $C_{ij}$  в одном из вариантов так, чтобы выполнялись условия его подобия другим ситуациям.

Отметим, что оба метода могут быть адаптированы для работы с неточной информацией, а именно: в случае отсутствия значений какого-либо из параметров соответствующие события и ограничения, в которых они присутствуют, могут быть удалены из прецедента, после чего обычным методом может быть оценена степень подобия.

Таким образом, организация прецедентов на основе МЗСТО позволяет учитывать, как последовательности событий, так и их длительности, т.е. как качественную, так и количественную информацию. В случае, если анализ длительностей не принципиален, а важен порядок событий, то можно воспользоваться качественной темпоральной логикой – например, точечной логикой, для которой в работах [Куриленко 2009; Еремеев и др, 2010, Куриленко и др., 2014] предлагаются достаточно быстродействующие алгоритмы вывода. В этом случае для представления прецедента может использоваться точечная ЗСТО (ТЗСТО), а определение степени схождения наблюдаемой ситуации и прецедента может основываться на решении задачи логической эквивалентности соответствующих минимальных ЗСТО.

## 2. Временные зависимости и их модели на основе темпоральных сетей Петри

Объекты, для мониторинга и управления, которыми используются ИС РВ (ИСППР РВ), в общем случае являются «неалгоритмическими» параллельными системами с недетерминированным поведением, в которых отдельные компоненты функционируют независимо, взаимодействуя друг с другом в некоторые моменты времени. Среди многих существующих методов описания и анализа подобных параллельных систем существует подход, который основан на использовании сетевых моделей, восходящих к сетям специального вида, предложенным К. Петри для моделирования асинхронных информационных потоков в системах преобразования данных [Котов, 1984]. *Сети Петри* (СП) зарекомендовали себя как удобный, наглядный, и в то же время математически строгий формализм для моделирования и анализа. СП позволяют естественно описывать синхронизацию, параллелизм, конфликт и причинную зависимость, а также наглядно представлять структуру и функционирование сложных систем.

СП изначально предназначались для моделирования изучения в динамике поведения системы параллельных процессов. Однако позже область использования этого аппарата существенно расширилась и сегодня формализм СП применяется для решения достаточно сложных теоретических задач, в том числе, из области искусственного интеллекта и ИС. Одной из работ, посвященных этому вопросу, является статья [Вагин и др., 1987], в которой обосновывается возможность использования СП для параллельного дедуктивного вывода. Следует, однако, отметить, что решение подобных «интеллектуальных» задач с помощью классического формализма СП зачастую требует построения крайне громоздких моделей. Поэтому активно развивается направление, связанное с разработкой различных модификаций СП, базирующихся на классических СП и обладающих дополнительными свойствами, необходимыми для эффективного решения определенных задач.

Отсутствие возможности учета фактора времени в классических СП не позволяет эффективно использовать их в контексте формализации темпоральных зависимостей и темпорального вывода в ИС РВ. Значительная часть исследований в области развития и модификации аппарата СП посвящена разработке различных темпоральных расширений. На кафедре Прикладной математики НИУ «МЭИ» в качестве базового формализма для использования в ИС РВ предложен аппарат *раскрашенных сетей Петри реального времени с поддержкой темпоральной логики Аллена* (РСП РВ ТЛА) [Еремеев и др., 2013].

Пусть  $L$  – язык типизированных выражений, которые построены из переменных и констант с использованием только операции сложения комплектов,  $U$  – конечная модель этого языка, элементами которой являются различные фишки.

Обозначим как  $U^{[1]} \cong \bigcup_{n \in \mathbb{N}_0} U^{[n]}$  множество всех конечных упорядоченных подмножеств вида  $U^{[n]} \cong \{[U[1], U[2], \dots, U[n]] \mid (\forall i \in 1..n) U[i] \in U\}$ , где  $(\forall i', i'' \in 1..n) (i' \neq i'' \Rightarrow U[i'] \neq U[i''])$ . Множество всех возможных комплектов (мультимножеств) из элементов множества  $U$  обозначим как  $U^{(1)} \cong \{(u_1, u_2, \dots, u_n) \mid n \in \mathbb{N}_0, (\forall i \in 1..n) u_i \in U\}$ .

Тип элемента  $x \in U$  обозначается как  $\xi(x)$ , тип выражения  $\theta \in L$  как  $\xi(\theta)$ . Множество переменных, входящих в выражение  $\theta$ , обозначается через  $\nu(\theta)$ . Определим РСП РВ ТЛА как кортеж

$$RTCPN \equiv \langle \Sigma, P, T, \dot{F}, \dot{\xi}, \dot{\gamma}, \pi, \varepsilon_\Sigma, \varepsilon_T, m_0 \rangle,$$

где:  $\Sigma$  – конечное множество типов (цветов),  $|\Sigma| \in \mathbb{N}$ ,  $\Sigma \subseteq U^{[1]}$ ;  $P \equiv [p_1, p_2, \dots, p_{|P|}]$  – конечное упорядоченное множество мест,  $|P| \in \mathbb{N}$ ;

$T$  – конечное множество переходов,  $|T| \in \mathbb{N}$ ,  $P \cap T = \emptyset$ ;

$\dot{F} \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  – непустое множество дуг,  $|\dot{F}| \in \mathbb{N}$ ;

$\dot{\xi} : P \rightarrow \Sigma$  – функция, ставящая в соответствие каждому месту  $p \in P$  тип  $\dot{\xi}(p) \in \Sigma$ : каждая фишка  $u \in U$  в  $p$  должна быть этого типа,  $u \in \dot{\xi}(p)$ ;

$$\dot{\gamma} : T \rightarrow Bool,$$

где  $Bool = \{true, false\}$  – защитная (охранная) функция, ставящая в соответствие переходу  $t \in T$  некоторое логическое выражение;

$\pi : T \rightarrow \mathfrak{R}_0$  – функция приоритетов переходов;

$\varepsilon_\Sigma : \dot{F} \rightarrow \dot{L}$  – функция весовых выражений дуг, ставящая в соответствие каждой дуге выражение языка  $\dot{L}$ , такое, что

$$\begin{aligned} &(\forall p \in P)(\forall f \in \dot{F}) \\ &((f \Leftarrow t, p \succ \vee f \Leftarrow p, t) \supset \\ &\supset \xi(\varepsilon_\Sigma(f)) \subseteq \dot{\xi}(p)); \end{aligned}$$

где  $\varepsilon_T : \dot{F} \rightarrow \mathfrak{R}_0$  – функция темпоральных выражений дуг;

$m_0 \in \ddot{M}$  – начальная маркировка (состояние) сети, где  $\ddot{M} \equiv \{m \mid m : P \rightarrow (U^{(1)} \cup \{\emptyset\}) \times \mathfrak{R}\}$  – множество всех возможных маркировок.

Полагаем, что для всех  $m \in \ddot{M}$  и  $p \in P$   $m(p) \equiv \langle \mu(p), \dot{\tau}(p) \rangle$ ,  $\mu(p) \in (U^{(1)} \cup \{\emptyset\})$ ,  $\dot{\tau}(p) \in \mathfrak{R}$ . Для любой фишки  $u \in \mu(p)$  выполняется  $u \in \dot{\xi}(p)$ . Второй компонент  $\dot{\tau}(p)$  определяет временную метку места. Для перехода  $t \in T$  обозначим  $V_t$  множество переменных языка  $\dot{L}$ , которые

встречаются в выражениях функций  $\varepsilon_\Sigma$  и  $\varepsilon_T$  входных и выходных дуг перехода и в выражении защитной функции  $\dot{\gamma}(t)$ . Подстановка перехода  $t \in T$  – функция  $\beta: V_i \rightarrow U^{(i)}$ , такая, что  $(\forall v \in V_i) \beta(v) \in \xi(v)$ . Запись  $\dot{\gamma}(t)_\beta$  обозначает вычисление защитной функции перехода  $t \in T$  в подстановке  $\beta$ ,  $\varepsilon_\Sigma(f)_\beta \in U^{(i)}$  и  $\varepsilon_T(f)_\beta$  обозначают вычисления функций соответственно весовых и темпоральных выражений дуги  $f \in \dot{F}$  в подстановке  $\beta$ .

Ключевым свойством РСП РВ ТЛА является поддержка работы с качественными темпоральными зависимостями: другие темпоральные модификации СП позволяют учитывать только количественные. О важности учета временных зависимостей обоих типов при работе с ИС РВ говорится, например, в [Еремеев и др., 2003].

В РСП РВ ТЛА для оперирования качественной временной информацией используются *интервалы*. Пусть  $T_n \equiv [\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n]$  – некоторое конечное упорядоченное подмножество моментов  $\tau_i \in T_D$ ,  $i \in 0..n$ ,  $T_D \equiv \{\tau \mid \tau = k * \tau', k \in \mathbb{N}_0, \tau' \in \mathbb{R}_+\}$ , где  $(\forall i, j \in 0..n)(i > j \supset \tau_i > \tau_j)$ . Назовем интервалом конечное упорядоченное подмножество  $Int \equiv [\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n]$ ,  $\tau_i \in T_D$ ,  $i \in 0..n$ , для которого  $(\forall i \in 1..n)(\exists k \in \mathbb{N})(\tau_i = k * \tau' \supset \tau_{i-1} = (k-1) * \tau')$ . Пусть  $\rho: P \times T_D \rightarrow U^{(i)} \times \mathcal{R}$  – функция, определяющая маркировку сети в момент времени  $\tau \in T_D$ , а  $U_p \equiv \{\dot{u} \mid \dot{u} \in U^{(i)}, (\forall u \in \dot{u}) u \in \xi(p)\}$  – множество комплектов фишек. Определим функцию  $\zeta: P \times U_p \rightarrow T_D$ :

$$\begin{aligned} \zeta(p, \dot{u}) &\equiv [\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_n], (\forall i \in 0..n) \tau_i \in T_D, \\ (\forall i, j \in 0..n)(i > j \supset \tau_i > \tau_j), \\ (\forall i \in 0..n)(\rho(p, \tau_i) = m(p) &\leq \mu(p), \dot{\tau}(p) > \dot{u} \subseteq \mu(p) \wedge \dot{\tau}(p) \leq 0). \end{aligned}$$

Подмножество  $\zeta(p, \dot{u})$  можно представить как кортеж интервалов:  $\zeta(p, \dot{u}) \leq Int_0, Int_1, \dots, Int_n >$ ,  $(\forall i \in 0..n) Int_i = [\tau_{i_0}, \tau_{i_1}, \dots, \tau_{i_n}]$ . Определим функцию  $\chi: \zeta \times T_D \rightarrow Int_D \cup \{\emptyset\}$ , ставящую в соответствие моменту времени  $\tau \in T_D$  интервал  $Int_i = [\tau_{i_0}, \tau_{i_1}, \dots, \tau_{i_n}]$  из кортежа  $\zeta(p, \dot{u}) \leq Int_0, Int_1, \dots, Int_m >$ :

$$\begin{aligned} \chi(\zeta(p, \dot{u}), \tau) &\equiv [(\exists Int_i = [\tau_{i_0}, \tau_{i_1}, \dots, \tau_{i_n}] \in \zeta(p, \dot{u})) \\ (\tau_{i_0} \leq \tau \wedge (\forall Int_j = [\tau_{j_0}, \tau_{j_1}, \dots, \tau_{j_n}] &\in \zeta(p, \dot{u})) \\ (j > i \supset \tau_{j_0} > \tau)) &\rightarrow Int_i : \emptyset]. \end{aligned}$$

В каждый момент работы модели на основе предлагаемого аппарата рассматриваются текущие или последние завершившиеся интервалы. В

качестве защитных функций переходов  $\dot{\gamma}: T \rightarrow Bool$  используются формулы темпоральной логики Аллена (ТЛА) [Allen, 1983]  $\varphi: (Int_D \cup \{\emptyset\}) \times (Int_D \cup \{\emptyset\} \times T_D) \rightarrow Bool$ :

$$\varphi = \chi(\zeta(p_1, \dot{u}_1), \tau) \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \chi(\zeta(p_2, \dot{u}_2), \tau),$$

где  $r_i \in B$ ,  $i \in 1..|B|$ ,  $p_1, p_2 \in P$ ,  $\dot{u}_1 \in U_{p_1}$ ,  $\dot{u}_2 \in U_{p_2}$ ,  $B$  – множество базисных отношений ТЛА.

Подобная модификация аппарата СП позволяет работать с темпоральными зависимостями между объектами сложных систем, как количественными, так и качественными. В настоящее время формализм РСП РВ ТЛА применяется на кафедре прикладной математики НИУ «МЭИ» в плане исследований и разработки методов и инструментальных средств конструирования ИСПР РВ семиотического типа на основе нетрадиционных логик. Рассматриваются вопросы анализа и верификации подобных сетей [Еремеев и др., 2015; Королев, 2015]. Планируется дальнейшее расширение области использования данного аппарата – в том числе, и в задаче формализации темпорального вывода.

### 3. Формирование обобщенных понятий с использованием темпоральных деревьев решений

Во многих случаях для описания поведения сложных систем приходится использовать сотни независимых атрибутов, которые необходимо анализировать, чтобы наиболее точно смоделировать поведение системы. В такой ситуации крайне важно решать задачу обобщения для получения компактных описаний классов ситуаций на объекте управления. Однако следует учесть, что важным параметром, отражающим динамику поведения сложной системы, является время. Обобщение информации, отражающей изменение ситуаций во времени, требует использования специальных методов, таких как, например, темпоральные деревья решений.

В рассматриваемой задаче информация о функционировании объекта управления представлена множеством результатов измерений, поступающих с датчиков; таким образом, состояние сложного объекта и его компонентов описывается набором признаков (количественных и качественных), при этом одним из признаков является время. Целью работы является получение обобщенных описаний классов ситуаций, возникающих на объекте, причем с каждым классом ситуаций связываются определенные действия по управлению объектом, называемые далее восстановительными действиями.

Рассмотрим возможные ситуации на объекте. Введем понятия:  $C_n$  – множество ситуаций, возникающих на сложном техническом объекте, которые диагностируются как нормальные;  $C_f$  – множество ситуаций, в которых наблюдаются

неисправности на объекте. Предлагается сформировать описание понятий  $C_n$  и  $C_f$  в рамках введенной модели. На основе полученных обобщенных описаний классов  $C_n$  и  $C_f$  необходимо выработать рекомендации по выбору восстанавливающего действия на сложном техническом объекте; такое действие должно переводить систему из состояния «неисправность» в состояние «норма».

Постановка задачи обобщения приведена в [Вагин и др., 2008]. Дано  $O$  множество объектов, представленных в некоторой интеллектуальной системе. Пусть  $V \subset O$  множество объектов системы, относящихся к определённому классу (множество положительных объектов).

$O = V \cup W$ ;  $V \cap W = \emptyset$ ,  $W$  образует множество отрицательных объектов относительно данного класса.

Пусть имеется обучающая выборка  $K = K^+ \cup K^-$ , такая, что  $K^+ \subset V$ ,  $K^- \subset W$ ,  $K^+ \cap K^- = \emptyset$ .

Необходимо на основе анализа обучающей выборки построить понятие, разделяющее положительные и отрицательные примеры. Понятие  $Q$  считается сформированным, если удалось построить решающее правило, которое для любого примера из обучающей выборки указывает, принадлежит ли этот пример понятию, или нет. Сформированное понятие может быть представлено в виде логической функции, дерева решений, набора продукционных правил вида «ЕСЛИ условие ТО искомое понятие».

Далее предлагается использовать метод деревьев решений, который широко используется в задачах классификации объектов, представимых признаковыми описаниями. Таким образом, формирование обобщенного понятия  $Q$  предлагается выполнить путем построения дерева решений. Однако деревья решений в их классическом виде имеют некоторые ограничения, в частности, невозможность работы с поведением объекта или системы во времени, невозможность принятия решений с течением времени. Без учета фактора времени не удастся проследить динамику изменения состояния системы. Предлагается расширить признаковое описание объектов: введем понятие «время» как один из атрибутов, используемых при построении дерева решений. Будем далее использовать дискретное время:  $t = 0, 1, 2, \dots$ .

Неформально *темпоральное дерево решений* (ТДР) – это дерево, в котором вершины-листья помечены видом неисправности и предлагаемым в данной ситуации восстановительным действием, а промежуточные вершины, называемые далее внутренними вершинами, помечены именами атрибутов, в совокупности с видом проверки и временной меткой. Дуги ТДР определяют переходы по результатам проверок значений атрибутов во внутренних вершинах.

Дадим формальное определение. ТДР — это взвешенный ациклический ориентированный граф  $Ttemp = (V_{temp}, E_{temp})$ . Во множестве вершин  $V_{temp}$  выделим вершину  $v_0 \in V_{temp}$  – корень дерева. Все вершины разделим на два класса:  $V_i \subseteq V_{temp}$  – множество внутренних вершин (узлов) дерева;  $V_l$  включает в себя такие вершины, из которых выходят дуги;  $V_l \subseteq V_{temp}$  – множество внешних, конечных, вершин дерева (листьев);  $V_l$  включает в себя такие вершины, из которых дуги не выходят.  $V_i$  и  $V_l$  образуют разбиение множества вершин  $V$  ТДР:

$$V_i \cap V_l = \emptyset,$$

$$V_i \cup V_l = V_{temp}.$$

Внутренние вершины  $V_i$  дерева взвешены (помечены) парой

$$\langle a, tc \rangle,$$

где  $a$  – имя атрибута;  $tc$  – временная метка.

Вершины-листья  $V_l$  взвешены (помечены) названием или номером ситуации из  $C_n \cup C_f$ . Если ситуация отнесена к классу  $C_n$  вершина – лист помечается названием или номером предлагаемого восстановительного действия.

Каждая дуга  $e$  ТДР взвешена условием «атрибут[ $tc$ ]=значение\_атрибута» (для качественных значений) либо «атрибут[ $tc$ ]  $\sigma$  значение\_атрибута» (для количественных значений атрибутов  $\sigma = \{ \geq, >, =, \leq, < \}$ ). Здесь «атрибут» – имя атрибута в вершине, из которой исходит дуга  $e$ , «значение атрибута» – одно из возможных значений (количественное или качественное) признака «атрибут»;  $tc$  – момент времени, в который необходимо проводить эту проверку,  $0 \leq tc < t^*$ .

Таким образом, основным отличием ТДР от обычных деревьев решений является наличие метки времени в каждом внутреннем узле дерева. Проверка значения атрибута во внутреннем узле дерева производится только в том случае, если момент времени, которым помечен набор значений датчиков, совпадает с временной меткой в этом узле.

ТДР предлагается использовать для решения задач диагностики сложного технического объекта; примером такой задачи может служить задача бортовой диагностики автомобиля. Данные, поступающие с различных датчиков, описывают состояние всей системы в конкретный момент времени, а использование ТДР позволяет проследить изменение состояния системы за некоторый интервал времени и выявить неисправности или неблагоприятные тенденции, которые могут по истечении некоторого времени повлечь неисправности.

На основании анализа известного алгоритма для построения ТДР, изложенный в [Console et al., 2003] (назовем его CPD как сокращение от фамилий авторов – Console-Picardi-Dupre) был разработан оригинальный алгоритм Temporal ID3, который

является расширением алгоритма ID3 [Quinlan, 1986], учитывающим фактор времени. По сравнению с алгоритмом CPD, на ТДР не накладывается никаких ограничений по временным меткам в узлах. Однако не учитывается стоимость восстановительных действий при выборе наблюдения на каждом шаге. Кроме того, снимается ограничение на неуменьшение временных меток при движении от корня дерева к листьям, что приводит к необходимости сохранять некоторые значения датчиков для дальнейшего использования при проведении диагностики.

Исходными данными как для первоначального обобщения, так и для диагностики, является таблица наблюдений. Также может использоваться некоторая модель для восстановительных действий: например, может быть введен частичный порядок над действиями — тогда при наличии неразличимых ситуаций и сравнимых действий достаточно будет выполнить наиболее сильное из действий. Общая схема алгоритма построения ТДР Temporal\_ID3 приведена ниже. На вход алгоритма подаются:

- 1) таблица с ситуациями;
- 2) наблюдения в виде множества пар <датчик, временная метка>;
- 3) модель восстановительных действий.

**Алгоритм Temporal\_ID3** (S: Таблица с ситуациями, O: Наблюдения, M: Модель восстановительных действий)

**Результат:** ТДР  $\tilde{T}$

**Начало**

*Если для всех ситуаций из S восстановительные действия совпадают,*

*то вернуть* Лист(S, M)

Пусть  $D$  — минимальный крайний срок для ситуаций из S.

*Если ситуации из S неразличимы на основе показаний датчиков с меткой времени  $t \leq D$ , то вернуть* Лист(S, M).

Выбрать наблюдение  $\langle s^*, t' \rangle$ , которое будет проверяться в данном узле дерева.

Пусть  $s^*_1, s^*_2, \dots, s^*_n$  — различающиеся показания датчика  $s^*$  в момент времени  $t'$ , а  $S^*_j, j=1, 2, \dots, n$  — подмножества ситуаций из S, состоящие из ситуаций с показанием  $s^*_j$  датчика  $s^*$  в момент времени  $t'$ .

Вернуть ТДР с корнем, помеченным выбранным наблюдением  $\langle s^*, t' \rangle$ , и дугами, помеченными  $s^*_1, s^*_2, \dots, s^*_n$  соединяющими

корень соответственно с ТДР

Temporal\_ID3( $S^*_1, O \setminus \{ \langle s^*, t' \rangle \}$ , M)

Temporal\_ID3( $S^*_2, O \setminus \{ \langle s^*, t' \rangle \}$ , M)

...

Temporal\_ID3( $S^*_n, O \setminus \{ \langle s^*, t' \rangle \}$ , M)

**конец**

В результате выполнения такой рекурсивной процедуры на выходе получаем ТДР. Функция Лист(S, M) на основе ситуаций и модели

восстановительных действий строит лист дерева, помечая его множеством восстановительных действий, полученным согласно модели.

При выборе наблюдения для разбиения используется критерий "прирост информативности" Куинлана [Quinlan, 1986]. Так как ограничение на неуменьшение временных меток при движении от корня дерева к листьям снято, при построении ТДР показания датчиков можно рассматривать как обычные атрибуты [Антипов и др., 2010]. Алгоритм строит такое ТДР, в котором с каждым узлом ассоциирован атрибут, являющийся наиболее информативным среди всех атрибутов, еще не рассмотренных на пути от корня дерева к листьям.

Было проведено моделирование процесса диагностики на основе использования ТДР. В случае обнаружения неисправности либо отказа, с помощью ТДР предлагается выбрать возможное восстановительное действие, способное предотвратить аварию. Как было показано выше, действия (восстановительные действия) характеризуются некоторой стоимостью, которая отражает уменьшение функциональности системы. Таким образом, основная цель процедуры диагностики заключается в выборе оптимального действия при динамическом изменении параметров.

При проведении эксперимента было выявлено, что ТДР, построенные с использованием алгоритмов CPD и Temporal ID3, правильно определяют значительное количество некорректных ситуаций и выбирают нужные восстановительные действия. При этом следует отметить, что одним из недостатков алгоритма CPD является большое число ложных срабатываний — так называемых ошибок первого рода. Поэтому минимизация размера ТДР не должна быть единственным критерием при его построении.

#### 4. Реализация формальных моделей темпоральных рассуждений средствами технологии OSTIS

Технология OSTIS (Open Semantic Technology for Intelligent Systems) представляет собой технологию компонентного (модульного) и платформенно независимого проектирования совместимых интеллектуальных систем различного назначения [Голенков и др., 2015].

Технология OSTIS ориентирована на проектирование интеллектуальных систем, имеющих сложноструктурированные базы знаний и реализующие параллельные модели обработки знаний. Это делает технологию OSTIS достаточно перспективной для реализации моделей темпоральных рассуждений. Особую важность здесь имеет то, что различные модели темпоральных рассуждений могут быть оформлены как компоненты интеллектуальных систем, многократно используемые и легко интегрируемые в различные интеллектуальные системы.



В интеллектуальных системах, построенных по технологии OSTIS (такие системы будем называть ostis-системами), база знаний представляет собой сложноструктурированную семантическую сеть, в которой имеются элементы, не только обозначающие внешние сущности и связи между ними, но и обозначающие различные классы элементов семантической сети, различные фрагменты этой сети, различные связи между указанными классами и фрагментами.

Основой формального представления моделей темпоральных рассуждений средствами технологии OSTIS является специально разработанная для этого иерархическая система предметных областей и соответствующих им формальных онтологий. В число указанных предметных областей входят:

- предметная область временных сущностей;
- предметная область ситуаций и событий;
- предметная область ситуаций и событий в семантической памяти (в памяти, где хранится база знаний ostis-системы);
- предметная область действий и задач;
- предметная область действий формальных агентов, работающих над семантической памятью.

## Заключение

В докладе представлены некоторые основные результаты, полученные в научных группах НИУ «МЭИ» (кафедра прикладной математики) и БГУИР (кафедра интеллектуальных информационных технологий) по проблематике формализации темпоральных рассуждений. Совместные исследования проводятся в плане разработки эффективных методов и моделей для использования их в перспективных интеллектуальных системах различного назначения, в частности, ИС РВ и ИСППР РВ семиотического типа, предназначенных для помощи ЛПП в проблемных ситуациях и в условиях достаточно жестких временных ограничений.

## Библиографический список

- [Вагин и др., 2001] Вагин В.Н., Еремеев А.П. Некоторые базовые принципы построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 6. – С. 114-123.
- [Вагин и др., 2015] Вагин В.Н., Еремеев А.П. Научная школа искусственного интеллекта в Московском энергетическом институте на базе кафедры прикладной математики: становление и развитие // Вестник МЭИ. – 2015. – № 2. – С. 29-37.
- [Еремеев и др., 2003] Еремеев А.П., Троицкий В.В. Модели представления временных зависимостей в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Известия АН. Теория и системы управления. – 2003. – № 5. – С. 75-88.
- [Еремеев и др., 2010] Еремеев А.П., Куриленко И.Е. Средства темпорального вывода для интеллектуальных систем реального времени // В кн.: Интеллектуальные системы. Коллективная монография. Выпуск 4 / Под. ред. В.М. Курейчика. – М.: Физматлит, 2010. – С. 222-252.
- [Еремеев и др., 2015 а] Еремеев А.П., Королев Ю.И. Анализ и верификация моделей процессов в сложных динамических системах // Российская академия наук. Искусственный интеллект и принятие решений. – 2015. – № 1. – С. 45-56.
- [Еремеев и др., 2015 б] Еремеев А.П., Королев Ю.И. Анализ и верификация раскрашенных сетей Петри реального времени с поддержкой логики Аллена // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: материалы IV Междуна.

научно-техн. конф. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 461-464.

[Montani et al., 2013] Stefania Montani, Lakhmi C. Jain. Successful Case-based Reasoning Applications-2. – Springer, 2013.

[Куриленко, 2009] Куриленко И.Е. Применение временной логики при построении интеллектуальной системы управления крупными парковочными комплексами // Сб. док. научно-практ. конф. ИММВИ 2009. Т.2 – М.: ФизМатЛит, 2009. – С. 171-180.

[Варшавский и др., 2009] Варшавский П.Р., Еремеев А.П. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений. // Российская академия наук. Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – №2. – С. 45-57.

[Куриленко и др., 2014] Куриленко И.Е., Шорникова Д.А. Реализация подсистемы временного вывода на базе точно-интервальной временной логики для систем поддержки принятия решений реального времени // Четырнадцатая нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2014: Тр. конф. Т.1. – Казань: Изд-во РИЦ «Школа», 2014. – С. 50-58.

[Котов, 1984] Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984.

[Вагин и др., 1987] Вагин В.Н., Захаров В.Н., Розенблюм Л.Я. Логический вывод на интерпретированных сетях Петри // Техническая кибернетика. – 1987. – № 5. – С. 187-195.

[Еремеев и др., 2013] Еремеев А.П., Королев Ю.И. Реализация интеллектуальных систем реального времени на основе сетей Петри с поддержкой темпоральных зависимостей // Программные продукты и системы. – 2013. – № 3 (103). – С. 88-94.

[Королев, 2015] Королев Ю.И. Верификация моделей процессов в динамических системах по методу Model Checking // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. (OSTIS-2015): материалы V Междуна. науч.-техн. конф. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 545-548.

[Вагин и др., 2008] Вагин В.Н., Головина Е.Ю., Загорянская А.А., Фомина М.В. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / Под ред. В.Н. Вагина, Д.А. Поспелова. 2-е издание дополненное и исправленное. – М.: Физматлит, 2008. – 712 с.

[Console et al., 2003] Console L., Picardi C., Duprè D. Temporal decision trees: model-based diagnosis of dynamic systems on-board // Journal of artificial intelligence research. 2003. №19.

[Quinlan, 1986] Quinlan J.R. Induction of decision trees // Machine learning. 1986. №1

[Антипов и др., 2010] Антипов С.Г., Фомина М.В. Метод формирования обобщенных понятий с использованием темпоральных деревьев решений // Искусственный интеллект и принятие решений. № 2, 2010. – С.64-76

[Голенков и др., 2015] Голенков В.В., Гулякина Н.А. Семантическая технология компонентного проектирования систем, управляемых знаниями // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015): материалы V Междуна.науч.-техн.конф.- Мн.: БГУИР, 2015. – с. 57-78.

## ABOUT THE TEMPORAL REASONING FORMALIZATION IN THE INTELLIGENT SYSTEMS

Vagin V.N.\*, Eremeev A.P.\*, Guliakina N.A.\*\*,  
National Research University «MPEI»,  
Moscow, Russia

[vagin@appmat.ru](mailto:vagin@appmat.ru); [eremeev@appmat.ru](mailto:eremeev@appmat.ru)

Belarusian State University of Informatics and  
Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus  
[guliakina@bsuir.by](mailto:guliakina@bsuir.by)

The formalizing of reasoning (inference), taking into account the time factor, and it's usage in modern and perspective intelligent systems of a different kind including real-time systems are considered in this paper. The work is supported by RFBR and BRFR.

**Keywords:** intelligent system, temporal reasoning, precedent, Petri-net, temporal decision tree, modeling, technology OSTIS.