

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 681.518.3

СЕМАНТИКА ЯЗЫКА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ФРЕЙМОВОЙ СРЕДЕ

А.И. Белоусов, В.П. Дерябкин

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королёва
443086, г. Самара, Московское ш., 34

E-mails: timone65@yandex.ru; deriabkin_v@mail.ru

Продукционно-фреймовая среда представления знаний предоставляет возможность построения интеллектуальных систем. Ядром такой системы является база знаний с использованием фреймовых структур как унифицированных элементов представления знаний. В статье рассмотрена и уточнена в соответствии с унифицированной моделью фрейма модель базы знаний инструментальной системы и семантика языка представления знаний.

Ключевые слова: *фрейм, слот, фрейм-прототип, фрейм-экземпляр, база знаний, унифицированное хранение знаний, экспертная система, продукция.*

Введение

Качество и своевременность принятия решений в сложных ситуациях во многом определяются информационным окружением лица, принимающего решение. В [1 – 3] рассмотрена концепция построения интеллектуальной информационной компьютерной среды с фреймовой структурой знаний, которая позволяла бы создавать, разворачивать и исполнять интеллектуальные приложения в различных предметных областях. Ядром такой среды является база знаний с использованием фреймовых структур как унифицированных элементов представления знаний. Несмотря на то, что фреймовая модель представления знаний предложена давно [4], до сих пор формализация процесса решения задач вызывает значительные трудности [5, 6].

В статье рассмотрена и уточнена в соответствии с унифицированной моделью фрейма модель базы знаний инструментальной системы и семантика языка представления знаний.

Структура базы знаний системы

Фреймы базы знаний могут быть подразделены на группы:

- активные в логическом выводе результата, имеющие слоты с исполняемыми присоединенными процедурами (демонами и/или значениями слотов) F_a – поведение этих фреймов определяет логический вывод;
- пассивные, не имеющие слотов с присоединенными процедурами F_p (они пред-

Артём Игоревич Белоусов, ассистент кафедры «Информационные системы и технологии».

Валентин Петрович Дерябкин (к.т.н.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии».

ставляют фреймы-структуры, аналогичные таблицам, из которых только можно брать информацию в процессе вывода, но изменение значений слотов на время вывода запрещено).

К активным фреймам относятся системные фреймы, например фрейм приложения и др., имеющие хотя бы одну присоединенную исполняемую процедуру.

Общая схема решения задачи зависит от того, в какой форме ищется решение:

1) традиционно, в форме алгоритма по данным пассивных фреймов;
 2) по образцу решения, наиболее близкого к образцу среди пассивных фреймов с использованием той или иной меры близости;

3) методом распространения возбуждения по сети фреймов, содержащих все возможные решения проблемы в группе конечных фреймов-результатов (экземпляров) по указанным экземплярам входных фреймов-параметров информационного запроса.

В системе должен иметься исходный активный фрейм запроса стандартной структуры, содержащий слоты параметров запроса, а также слот результата.

Следует различать базу знаний среды разработки – общую базу знаний, применимую для всех возможных приложений (справочная библиотека), и частную базу знаний (приложение), полностью определяющую состав и структуру частных фреймов-прототипов и экземпляров, специфичных для конкретного приложения.

Фрейм конкретного приложения является в общем случае агрегацией фреймов, входящих в информационную базу (пассивных во время решения задачи и переходящих в активные при вводе (сборе) информации) и активных фреймов логического вывода (в частном случае – одного).

Чаще всего приходится разделять фрейм-ситуацию «запрос» на частные фреймы достижения промежуточных результатов (агрегация фреймов-запросов).

Полная база знаний

$$K = K_{\text{системы}} + K_{\text{приложений}}, \quad K_{\text{приложений}} = \bigcup_{i=1}^N K_{\pi i},$$

где $K_{\pi i}$ – частная база знаний i -го приложения.

В состав базы знаний входят знания статические K_s (структуры фреймов, значения слотов на множестве типов T) и динамические K_d (системные методы и процедуры инструментальной системы, присоединенные процедуры и процедуры-демоны фреймов-приложений)

$$K = K_s + K_d = K_{s_sys} + K_{d_sys} + \bigcup_{i=1}^N K_{s_app_i} + \bigcup_{i=1}^N K_{d_app_i},$$

где индекс sys относится к инструментальной системе, индекс app_i – к i -му приложению.

Фреймы

Фрейм как единица представления знаний отображает как статические, так и динамические знания, причем все множество фреймов F , эквивалентное знаниям K , представляется в виде

$$F = F_{sys} + F_{app1} + F_{app2} + \dots + F_{appN},$$

где F_{app_i} – множество фреймов i -го приложения (множества могут пересекаться).

Фрейм рассматривается как некоторый контейнер (пакет) знаний, имеющий имя (идентификатор $id \in I, I \subset \Pi$ (Π – полное множество идентификаторов фреймов и слотов) и содержащий как агрегацию набор слотов. Каждый слот $s \in S$ является также носителем статических и динамических знаний в виде возможных значений,

определенных на системе типов T , и набора присоединенных процедур из некоторого множества выражений E , λ -выражений $\Lambda(T)$; $E \subseteq \Lambda(T)$ [6]. В частном случае λ -выражение может включать константы, в том числе имена присоединенных процедур, а также ссылки на другие слоты и значения NIL (неизвестно).

Для формализации фреймовых структур будем (аналогично [6]) рассматривать функцию состояний $w: I \rightarrow F$, отображающую множество идентификаторов в множество фреймов (эта функция фиксирует состав всей базы знаний на текущий момент); $w \in W$, где W – множество возможных состояний.

Обозначим через $W_{IA} \subseteq W$ состояние информационной базы приложения, которое определяет часть фреймов приложения (системных и приложения), пассивных по отношению к логическому выводу, а через $W_{CA} \subseteq W$ – состояние системы управления выводом (решателя) – набора активных фреймов.

Каждый фрейм $f \in F$ является функцией $f: I_f \rightarrow S$, отображающей множество идентификаторов слотов фрейма в множество слотов S . Динамические знания представляются множествами демонов и присоединенных процедур и правил. Состояние W_{IA} информационной базы приложения на период вывода считается неизменным.

Считаем, что фреймы включают слоты, задаваемые в общем случае кортежами

$$S = \langle v, u, \{Q_i\}, \{D_j\}, \{C_k\}, \alpha \rangle,$$

$v \in T$ – значение слота; $u \in T$ – значение слота по умолчанию; $\{Q_i\}$ – упорядоченное множество присоединенных к слотам процедур-демонов поиска значений слота типа IF_NEEDED; $\{D_j\}$ – упорядоченное множество присоединенных к слоту процедур-демонов типа IF_CHANGED, обрабатывающих событие изменения значения слота; $\{C_k\}$ – упорядоченное множество ограничений на значения слота (набор правил или предикатов $C_k \in E$); α – флаг, используется в контексте вывода для управления выводом, булевского типа.

Для доступа к значениям слота используем операцию разыменования:

$$s.v, s.u; s.IF_NEEDED_i; s.\alpha \text{ и т. п.}$$

Считая идентификаторы фреймов уникальными во всей системе, а идентификаторы слотов – уникальными в пределах фрейма, в операции разыменования объекты f и s заменяем их соответствующими идентификаторами и в этом контексте можем считать, что запись $f.s$ одновременно является идентификатором (адресом) слота s во фрейме f .

В первоначальном состоянии (на нулевом шаге вывода) $f.s.v = \text{NIL}$ для всех слотов всех фреймов подсистемы вывода, а также $f.s.\alpha = \text{NIL}$.

Операции присваивания значения слоту будем рассматривать как функцию, в общем случае осуществляющую изменение состояния:

- а) системы в целом;
- б) информационной базы в режиме только пополнения длительно хранимых знаний;
- с) только подсистемы вывода в процессе получения результата решения задачи при неизменном состоянии информационной базы.

Система типов фреймовой среды

Определим на множестве фреймов инструментальной среды систему типов. В данной системе при выполнении операций присваивания в вычислении выражения производится строгая проверка типов. Полагаем, что в нашем случае более слабые

ограничения системы без типизации обязательно будут выполнены для систем со строгой типизацией.

А именно: пусть система типов – $\tau = \langle T, \Theta \rangle$, где T – множество типов, Θ – множество операций.

Условия:

1. T – решетка с отношениями порядка \subseteq .
 2. $\exists \text{NIL} \in T : \forall x \in T \quad \text{NIL} \in X, x \in X$.
 3. $\forall (* \in E) : \forall x, y \in T \quad x (* y \in T$.
 4. $\forall (* \in E) : \forall x \in T \text{NIL} (* x = x (* \text{NIL} = \text{NIL}$.
- где $(*)$ – множество арифметических операций.

Будем рассматривать следующие типы данных:

1. $B = \{\text{true}, \text{false}\}$ – логический тип.
2. N – множество натуральных чисел, представимых в ЭВМ с разрядностью не менее 32.
3. D – множество действительных чисел, представимых в ЭВМ с разрядностью не менее 32.
4. P – множество строк в некотором алфавите A .
5. R – множество ссылок, $R = R1 + R2$, где $R1 = I$, $R2 = \langle f, s \rangle$, $f \in I, s \in I_f$.
6. $M = M1 + M2$ – множество массивов одномерных и двумерных.
7. L – множество списков конечной длины из элементов одного типа $T = \{\text{NIL}\} + B + N + D + S + R + M + L$.

Так как на всех рассматриваемых типах может быть введено отношение порядка \subseteq , то при условии неизменности знаний о значениях по умолчанию ссылок по агрегациям и обобщениям, а также процедурных знаний отношение порядка может быть определено на множестве пространства состояний, и в частности на множестве W_{CA} . В дальнейшем, учитывая неизменность состояний информационной базы, в процессе логического вывода индекс «СА» для состояний будем опускать, считая, что рассуждения о смене состояний ведутся лишь для фреймов, участвующих в логическом выводе, для которых изменяются значения $f.s.v$ и $f.s.a$, и если a – признак активности фрейма в логическом выводе, то при $f.s.a = \text{false}$ слот s фрейма f не может изменить свое значение в процессе вывода, что должно быть проконтролировано в процедурах вывода.

Фреймы-экземпляры являются конечными в иерархии и наследников не имеют [3]. Отсутствовать значение может только у системного фрейма самого верхнего уровня, и он только один. У остальных фреймов значение прямого родителя имеется обязательно и заполняется при создании нового частного фрейма-прототипа или фрейма-экземпляра. Поскольку наследование в системе является обязательным для всех фреймов, то при обращении к слоту за значением («чтение») и его отсутствием проверяется, нельзя ли определить это значение по цепочке «снизу вверх» обобщений (это может быть зафиксировано одним из предикатов $C_i \in C_k$, прикрепленных к данному слоту). Такая ситуация возможна в процедуре IF_NEEDED i которая также наследуется от родителя [7].

Определим синтаксис множества выражений. Выражения, «продвигающие» шаги вывода, делятся, как и фреймы, на активные (содержащие операции присваивания, записи нового значения слота) и пассивные (информационные) вспомогательные, не

содержащие операций изменения значений слотов и лишь подготавливающие промежуточные данные для вычисления выражений на последующих шагах вывода, однако демоны IF_NEEDED всегда активны, если не завершаются ошибкой, а демоны IF_CHANGED могут быть как активными, так и пассивными.

Для выражения $E = f.s$ определим следующую систему вычисления значений слота:

$$\|f.s\|^c = \begin{cases} f.s.v, \text{если } v \neq \text{NIL} \\ f.s.u, \text{если } v = \text{NIL} \text{ и } f.s.u \neq \text{NIL} \\ \|f.s.\text{IF_NEEDED}_i\|, \text{если } v = \text{NIL}, \\ f.s.\text{IF_NEEDED}_i \neq \text{NIL}, f.s.u = \text{NIL} \\ \text{NIL}, \text{если } v = \text{NIL}, f.s.u = \text{NIL}, f.s.\text{IF_NEEDED}_i = \text{NIL} \end{cases}$$

Предполагается, что контекст $C \in C_k$ разрешает активизировать только одну

процедуру IF_NEEDED из множества $\{Q_i\}$, $i = \overline{1, n}$ (одновременный вызов двух процедур-оракулов считается конфликтом и должен исключаться предикатом или правилом c контекста). Значение $f.s.v$ может быть установлено равным значению $g.s.v$ соответствующего родительского фрейма, если это разрешено контекстом, при выполнении операции создания нового фрейма. Все процедуры-демоны и присоединенные процедуры и правила наследуются потомками, что учитывается при создании фрейма. Если контекст C отсутствует ($C = \text{NIL}$), то $\|f.s\|^{\text{NIL}} = \|f.s\|$, но при этом используется первая по порядку (младшая) процедура $f.s.\text{IF_NEEDED}_1 = Q_1$. Процесс вычисления выражения $f.s.\text{IF_NEEDED}_i$ может включать в себя вызов функции оракула (запроса к внешней среде с использованием некоторой текстовой команды – дескриптора dsc).

Контекст $C_k \subseteq C$ определяет в том числе и семантику наследования при вычислениях. В принципе, часть этого контекста, выделенная в виде набора правил IF_USED, прикрепленных к фрейму f , в целом может определять условия использования значений слотов, демонов и присоединенных процедур, родительских фреймов.

Будем рассматривать следующие операции для композиции выражений во множестве $E (E_1 \in E, E_2 \in E)$.

1. Подстановка константы из множества типов T .
2. Ссылка на слот $f.s, f \in I, s \in I_f$.
3. Арифметическая операция $E_1 \circledast E_2, \circledast \in \{+, -, *, /\}$.
4. Логическая операция $E_1 \boxed{\cdot} E_2 \boxed{\cdot} \in \{or, and\}$ или NOT E_1 .
5. Условная операция $E_0 \rightarrow E_1, E_2$ или $E_0 \rightarrow E_1$.
6. Вызов функции-оракула (запросы значений путем обращения к внешней среде) A .

где $\boxed{\cdot}$ - множество логических операций.

Арифметические и логические операции должны соответствовать множеству типов T и условиям строгой типизации выражений из IE (общие ограничения на множестве типов уже были рассмотрены).

Константа соответственного типа может подставляться вместо переменной или выражения в целом независимо от состояния системы вывода.

Условное выражение вычисляется по схеме

$$\| E \rightarrow E_1, E_2 \| ^c = \begin{cases} \| E_1 \| ^c, \| E \| ^c = true \\ \| E_2 \| ^c, \| E \| ^c = false \end{cases}$$

Заключение

Изложенный подход и нотация могут быть использованы в процессе разработки языка представления знаний и обоснования стратегий решения задач в интеллектуальной информационной среде с унифицированной фреймовой базой знаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дерябкин В.П.* База знаний системы синтеза и параметрической настройки проблемно-ориентированной информационной компьютерной среды // Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении «ПИТ-2006», Т. 1. – Самара: СГАУ, 2006. – С. 65-69.
2. *Дерябкин В.П.* Среда визуальной разработки интеллектуальных систем продукционно-фреймового типа // Математическое моделирование информационных процессов и систем в науке, технике и образовании. – Самара: СГАСУ, 2010. – С. 48-51.
3. *Дерябкин В.П., Белоусов А.И.* Фреймовая база знаний информационной компьютерной среды // Перспективные информационные технологии для авиации и космоса (ПИТ-2010). Избранные труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – Самара: СГАУ, 2010. – С. 61-64.
4. *Minsky M.* A Framework for Representing Knowledge / M.A. Minsky. – Cambridge: MIT Press, 1974.
5. *Джарратано Д.* Экспертные системы: принципы разработки и программирования, 4-е изд. / Д. Джарратано, Г. Райли. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 1152 с.
6. *Сошников Д.В.* Логический вывод на основе удаленного вызова и включения в системах с распределенной фреймовой иерархией / Д.В. Сошников // Под ред. В.Е. Зайцева. – М.: Вузовская книга, 2002. – 48 с.
7. *Белоусов А.И., Дерябкин В.П.* Унифицированное представление знаний продукционно-фреймового типа // Стандартизация информационных технологий и интероперабельность СИТОП 2011. Пятая всероссийская конференция. – М.: МИРЭА, 2011. – С. 12-16.

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2013 г.

LANGUAGE SEMANTICS OF KNOWLEDGE REPRESENTATION IN THE INTELLECTUAL FRAME-BASED ENVIRONMENT

A.I. Belousov, V.P. Deriabkin

S.P. Korolyov Samara State Aerospace University
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086

Production-frame-based environment of knowledge representation allows to construct intelligent system. The core of such system is a knowledge base using the frame structures as standard elements of knowledge representation. In the article a model of knowledge base of development system and semantics of knowledge representation are discussed and refined in accordance with the unified model of frame.

Keywords: *frame, slot, frame-prototype, frame-instance, knowledge base, unified storage knowledge, expert system, production.*

*Artem I. Belousov, Assistant.
Valentin P. Deriabkin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

ОПТИМАЛЬНЫЙ ВЫБОР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ТОЧЕК КОНТРОЛЯ ПРИ НЕПОЛНОМ ИЗМЕРЕНИИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ПРОЦЕССЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ*

А.Н. Дилигенская, Э.Я. Рапопорт

ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается задача оптимального расположения точек измерения функции состояния нестационарного процесса теплопроводности, минимизирующего погрешность ее восстановления. Проблема сводится к минимизации ошибки равномерного приближения к нулю разности функций Грина идентифицируемого и модельного представления решений исследуемой краевой задачи.

Ключевые слова: *Функции Грина, неполное измерение состояния, равномерное приближение, альтернативный метод*

При синтезе замкнутых систем управления объектами с распределенными параметрами (ОРП) или при решении задачи идентификации неконтролируемого пространственно-временного внешнего воздействия (например, функции внутреннего тепловыделения при индукционном нагреве) получение максимально возможной информации о функции состояния объекта в каждый момент времени в любой точке пространственной области определения объекта является сложной актуальной задачей. Ее сложность заключается в том, что получить полную информацию принципиально невозможно, т.к. практическое измерение бесконечного числа управляемых величин может быть осуществлено только с помощью конечного числа измерительных устройств. В этом случае речь идет только о неполном измерении состояния объекта [1]. В связи с этим, задача оптимального расположения измерительных устройств, минимизирующего погрешность восстановления функции состояния объекта, имеет важное значение.

Рассматривается процесс нестационарной теплопроводности с внутренним тепловыделением $F(x, \varphi)$, описываемый линейным одномерным неоднородным уравнением Фурье с краевыми условиями третьего рода, представленный в относительных единицах изменения пространственной координаты $x \in [0, 1]$ и безразмерного времени $\varphi \in [0, \varphi^0]$, которому соответствует бесконечная система уравнений первого порядка относительно временных мод $\bar{\theta}_n(\varphi)$ управляемой функции состояния [2]:

$$\frac{d\bar{\theta}_n}{d\varphi} = -\mu_n^2 \bar{\theta}_n + \bar{F}_n, \quad \bar{\theta}_n(0) = \bar{\theta}_0(\mu_n), \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 12-08-00277).

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Анна Николаевна Дилигенская (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

где μ_n - известные собственные числа модели объекта, $\bar{\theta}_n = \bar{\theta}(\mu_n, \varphi)$; $\bar{F}_n = \bar{F}(\mu_n, \varphi)$; $\bar{\theta}_n(0) = \bar{\theta}(\mu_n, 0)$ - изображения по методу конечных интегральных преобразований температурного поля $\theta(x, \varphi)$, функции внутреннего тепловыделения $F(x, \varphi)$ и начального температурного распределения $\theta_0(x)$.

Предполагается, что в течение всего процесса нагрева нестационарное температурное поле $\theta(x, \varphi)$ внутри пространственной области D в пределах объема нагреваемого тела контролируется с помощью конечного числа N наблюдающих устройств. Измерения проводятся в некоторой пространственной области $\bar{D} \subset D$, не совпадающей с областью определения координаты x . В результате эксперимента имеются температурные зависимости $\theta_i^*(\varphi) = \theta(x_i^*, \varphi)$, полученные в некоторых фиксированных точках $x_i^* \in [0, 1]$, $i = \overline{1, N}$. При этом для обеспечения удовлетворительной точности число N должно быть достаточно большим.

Требуется в конце интервала идентификации $\varphi = \varphi^0$ при заданном числе N наблюдающих устройств определить координаты их размещения $x^* = (x_i^*)$, $i = \overline{1, N}$ таким образом, чтобы оцениваемое в равномерной метрике отклонение аппроксимирующей зависимости $\tilde{\theta}(x, x^*, \varphi)$ управляемой величины $\theta(x, \varphi)$, полученное по результатам измерений $\theta^*(\varphi) = (\theta(x_i^*, \varphi))$, от ненаблюдаемого точного значения $\theta^0(x, \varphi)$ по всей области изменения $x \in [0, 1]$ было минимально возможным

$$I(x^*) = \max_{x \in [0, 1]} |\theta^0(x, \varphi^0) - \tilde{\theta}(x, x^*, \varphi^0)| \rightarrow \min_{x^*}. \quad (2)$$

Задача аппроксимации пространственно-распределенного температурного поля может быть решена на основе модального представления функции состояния ОРП в форме конечного числа N первых членов бесконечного ряда

$$\theta(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x) \quad (3)$$

разложения $\theta(x, \varphi)$ по ортогональной системе собственных функций $\{\phi_n(\mu_n, x)\} = \{\cos(\mu_n x)\}$ [2, 3] с временными модами $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$ в роли его коэффициентов.

Число учитываемых мод в (3) не должно превышать количество точек контроля N . Значения временных мод $\bar{\theta}(\varphi) = \{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)\}$ определяются на основе экспериментальных зависимостей $\theta_i^*(\varphi)$

$$\theta_i^*(\varphi) \approx \sum_{n=1}^N \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x_i^*), \quad i = \overline{1, N}, \quad (4)$$

как решение системы уравнений (4), в векторной форме записи имеющей вид

$$\bar{\theta}(\varphi) = \Phi(\mu, x^*)^{-1} \times \theta^*(\varphi). \quad (5)$$

Квадратная матрица $\Phi(\mu, x^*) = \|\phi_n(\mu_n, x_i^*)\|$ содержит значения $n = \overline{1, N}$ собст-

венных функций объекта для точек контроля x_i^* , $i = \overline{1, N}$. В итоге получается система для определения значений $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$

$$\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) = \sum_{i=1}^N K_{ni} \theta_i^*(\varphi), \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (6)$$

где коэффициенты K_{ni} в (5) определяются по формулам Крамера для матрицы $\Phi(\mu, x^*)$ [1].

На основании (3) и (6) аппроксимирующее выражение $\tilde{\theta}(x, x^*, \varphi)$, зависящее от координат точек измерения x_i^* , примет вид

$$\tilde{\theta}(x, x^*, \varphi) \approx \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N K_{ni} \theta(x_i^*, \varphi) \phi_n(\mu_n, x). \quad (7)$$

Особенность постановки задачи (2) состоит в том, что точное значение функции состояния $\theta^0(x, \varphi)$ при произвольном характере функции внутреннего тепловыделения $F(x, \varphi)$ принципиально неизвестно.

В таком случае воспользуемся основным соотношением, связывающим выход объекта $\theta(x, \varphi)$ с внешним воздействием через основную фундаментальную характеристику ОРП, отражающую внутренние свойства объекта и не зависящую от характера входных воздействий – функцию Грина $G(x, \xi, \varphi - \tau)$ [2,4]. Точное решение $\theta^0(x, \varphi)$ при этом имеет вид

$$\theta^0(x, \varphi) = \int_0^{\varphi} \int_0^1 G(x, \xi, \varphi - \tau) F(\xi, \tau) d\xi d\tau, \quad (8)$$

где ξ и τ - переменные интегрирования по пространственной координате и времени, а входящие в (7) зависимости для измеряемых температур можно представить в виде

$$\theta(x_i^*, \varphi) = \int_0^{\varphi} \int_0^1 G(x_i^*, \xi, \varphi - \tau) F(\xi, \tau) d\xi d\tau. \quad (9)$$

В этом случае задача (2) на основании (6) и (9) формулируется как специальная задача математического программирования (СЗМП)

$$I(x^*) = \max_{x \in [0,1]} \left| \int_0^{\varphi} \int_0^1 \left(G(x, \xi, \varphi - \tau) - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N K_{ni} G(x_i^*, \xi, \varphi - \tau) \phi_n(\mu_n, x) \right) \times \right. \\ \left. \times F(\xi, \tau) d\xi d\tau \right| \rightarrow \min_x, \quad (10)$$

рассматриваемая на замкнутом компактном множестве параметров $x^* = (x_i^*)$, обеспечивающих минимальное значение критерия (10). Минимизация $I(x^*)$ при любом пространственно-временном воздействии $F(x, \varphi)$ достигается путем перехода к решению задачи

$$I_1(x^*) = \max_{x \in [0,1]} \left| \int_0^{\varphi^0} \int_0^1 \left(G(x, \xi, \varphi^0 - \tau) - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N K_{ni} G(x_i^*, \xi, \varphi^0 - \tau) \phi_n(\mu_n, x) \right) d\xi d\tau \right| \rightarrow \min_{x^*}. \quad (11)$$

Используя известные выражения значений функции Грина рассматриваемого объекта [2, 4]

$$G(x, \xi, \varphi - \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(\mu_m x) \cos(\mu_m \xi) \exp(-\mu_m^2 (\varphi - \tau)), \quad (12)$$

$$G(x_i^*, \xi, \varphi - \tau) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos(\mu_m x_i^*) \cos(\mu_m \xi) \exp(-\mu_m^2 (\varphi - \tau)), \quad (13)$$

где

$$A_m = \frac{2\mu_m}{\mu_m + \sin \mu_m \cos \mu_m}, \quad (14)$$

и выполняя процедуры интегрирования по пространственной ξ и временной τ координатам, можно перейти к конкретному виду минимаксного критерия (11)

$$I_1(x^*) = \max_{x \in [0,1]} \left| \left(\sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\mu_m)}{\mu_m^3} \cos(\mu_m x) - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N K_{ni} \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\mu_m)}{\mu_m^3} \cos(\mu_m x_i^*) \cos(\mu_n x) \right) (1 - \exp(-\mu_m^2 (\varphi^0))) \right| \rightarrow \min_{x^*}. \quad (15)$$

Решение СЗМП (15) осуществляется относительно вектора параметров пространственных координат $x^* = (x_i^*)$ на некотором замкнутом ограниченном множестве, на котором разность

$$\left(\sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\mu_m)}{\mu_m^3} \cos(\mu_m x) - \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N K_{ni} \sum_{m=1}^{\infty} A_m \frac{\sin(\mu_m)}{\mu_m^3} \cos(\mu_m x_i^*) \cos(\mu_n x) \right) \times (1 - \exp(-\mu_m^2 (\varphi^0))) \quad (16)$$

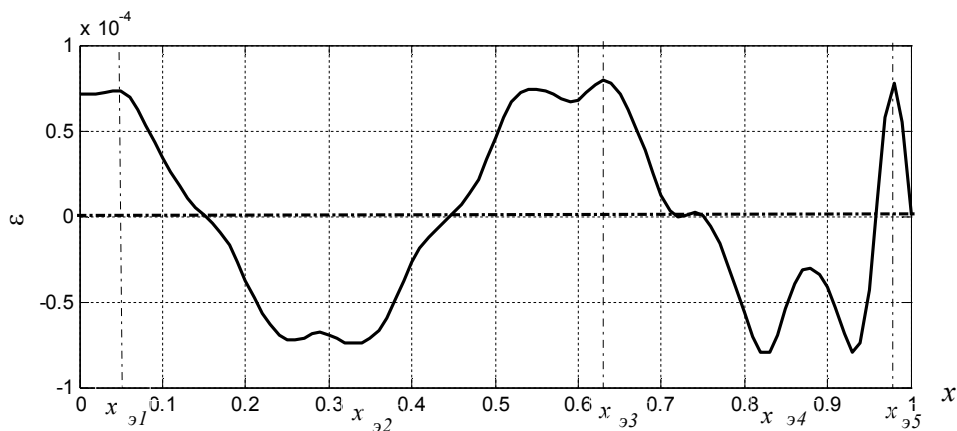
обладает специальными свойствами чебышевского альтернанса [5].

На основании этого на интервале $[0,1] \ni x$ достигаются знакопеременные максимальные по абсолютной величине значения, равные $\pm I_0(\Delta^0)$ в точках, число которых $N + 1$ на единицу превышает число искомых параметров. В соответствии с этим, для различных вариантов допустимой пространственной конфигурации кривой погрешности аппроксимации (16) составляется замкнутая система $N + 1$ соотношений для предельных отклонений в этих точках относительно всех неизвестных. Решение этой системы и дает искомый вектор значений пространственных координат точек размещения наблюдающих устройств.

В качестве примера рассматривался частный случай пространственно-временного управления $F(x, \varphi) = const$ при фиксированном числе наблюдающих устройств $N = 4$. Численным решением соответствующей системы уравнений были найдены оптимальные значения координат точек контроля $x^* = [0.1506; 0.4461; 0.7199; 0.7513]^T$. Температурные зависимости $\theta(x_i^*, \varphi)$,

$i = \overline{1,4}$, полученные в рассчитанных точках x^* , $i = \overline{1,4}$, позволили провести аппроксимацию неизвестного температурного состояния $\theta(x, \varphi)$ на основе его представления в виде суммы в (7).

Полученная при этом результирующая пространственная конфигурация ошибки равномерного приближения температурного поля $\tilde{\theta}(x, x^*, \varphi)$ к его точному значению $\theta^*(x, \varphi)$, представленная на рисунке, на рассматриваемом интервале $[0, 1] \ni x$ отличается наличием пяти упорядоченных по возрастанию точек $x_{\varepsilon i}$, $i = \overline{1,5}$, в которых достигаются знакопеременяющиеся максимальные по абсолютной величине отклонения $\varepsilon(x, \varphi^0) = \theta^0(x, \varphi^0) - \tilde{\theta}(x, x^*, \varphi^0)$.



Ошибка $\varepsilon(x, \varphi^0) = \theta^0(x, \varphi^0) - \tilde{\theta}(x, x^*, \varphi^0)$ равномерного приближения расчетного температурного поля к идентифицируемому температурному состоянию в конечный момент времени φ^0 при оптимальном расположении четырех наблюдающих устройств

Таким образом, решение задачи оптимального расположения наблюдающих устройств может быть основано на возможности аппроксимации неполностью измеряемой функции состояния $\theta(x, \varphi)$ в виде ее разложения в усеченный сходящийся в среднем [5] ряд по ортогональной системе собственных функций $\phi_n(\mu_n, x)$ с временными модами объекта $\bar{\theta}(\varphi) = \{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)\}$, $n = \overline{1, N}$ в роли коэффициентов ряда. Число учитываемых членов ряда должно быть равно числу точек контроля температурного распределения. При этом для получения адекватных результатов точность полученного описания $\theta(x, \varphi)$ суммой лишь первых N членов ряда должна быть удовлетворительной.

Задача определения координат мест расположения устройств контроля, минимизирующего погрешность восстановления температуры, может быть сведена к специальной задаче математического программирования. При определении координат точек измерения приходится учитывать известные ограничения: для определения временных мод $\bar{\theta}(\varphi)$ на основе (5) или (6) объект должен обладать свойством наблюдаемости, для чего достаточно, чтобы пространственные координаты точек наблюдения x_i^* не являлись нулями ни одной из собственных функций краевой задачи

$\phi_n(\mu_n, x)$ [1]. Влияние остальных неучтенных мод объекта $\bar{\theta}(\varphi) = \{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)\}$, $n = N + 1, N + 2, \dots$ формирует ошибку аппроксимации $\varepsilon(x, \varphi) = \theta^0(x, \varphi) - \tilde{\theta}(x, x^*, \varphi)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.
2. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. М.: Высшая школа, 2003.
3. Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001.
4. Бутковский А.Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
5. Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. – 336 с.

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2013 г

THE OPTIMAL DECISION OF THE SPATIAL COORDINATES OF CONTROL POINTS IN CASE OF INCOMPLETE STATE MEASUREMENTS OF THE PLANT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS DURING THE CONTROL ACTIONS IDENTIFICATION

A.N. Diligenskaya, E.Ya. Rapoport

Samara State Technical University
224, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of optimal location of measurement points of the state function of non-steady heat conductivity process to minimize the approximation error is solved. It is considered an uniform error of approximation of Green's function of identified plant by Green's function of investigated boundary value problem.

Keywords: *Green's functions, incomplete state measurements, uniform approximation, alternance method.*

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОНТОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ НИР И ОКР

***Е.М. Клейменова¹, П.О. Скобелев², В.Б. Ларюхин², Д.С. Косов²,
Е.В. Симонова²***

¹ ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева
141070, г. Королёв, ул. Ленина, 4а

² ООО «НПК «Разумные Решения»
443013, г. Самара, Московское ш., 17, оф. 1201

Описываются принципы построения специализированной онтологии управления НИР и ОКР предприятия. Приведены примеры применения онтологического подхода для управления деятельностью сотрудников на различных этапах выполнения проектов.

Ключевые слова: модель мира Аристотеля, онтология предметной области, управление проектной деятельностью предприятия.

Введение

Онтологии предметных областей завоевывают все большее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений. В настоящее время известен целый ряд конструкторов онтологий, позволяющих создавать крупные промышленные приложения [1-5], например, для аннотирования статей в Интернет в рамках проектов Semantic Web.

В то же время, когда речь идет о создании планирующих и моделирующих систем, которые имеют дело с объектами и действиями, категориями пространства и времени, перечень возможных для использования конструкторов сужается, т. к. они не содержат эффективных механизмов поддержки работы с описаниями связанных операций, которые требуется планировать или моделировать. Аналогично дело обстоит и с моделями самих онтологий, которые требуются для формализации знаний о технических изделиях и процессах их проектирования и реализации.

В настоящей статье предлагается новая модель онтологии, применяемая для формализации процессов планирования распределения ресурсов при управлении проектами НИР и ОКР. Задача управления проектами и работами является одной из сложных и актуальных для предприятий, проводящих научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. Сложность данной задачи обусловлена тем, что процесс управления проектами состоит из переменного ряда взаимосвязанных этапов, на каждом из которых необходимо учитывать множество факторов и критериев для успешного достижения поставленных целей и выполнения задач. Эти параметры могут зависеть как от особенностей конкретной организации, так и от сложившейся

Елена Михайловна Клейменова, аспирант, руководитель НТЦ «Корпоративные информационные технологии».

Петр Олегович Скобелев (д.т.н.), профессор кафедры «Инженерия знаний» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и связи.

Владимир Борисович Ларюхин, директор по разработкам ООО «НПК «Разумные решения», аспирант.

Даниил Сергеевич Косов, аналитик ООО «НПК «Разумные решения».

Елена Витальевна Симонова (к.т.н.), доцент кафедры «Информационные системы и технологии» Самарского государственного аэрокосмического университета.

ситуации, и должны учитывать знания и опыт инженеров.

Использование онтологического подхода позволит решить проблему поддержки принятия решений при управлении проектами НИР и ОКР за счет возможности более детального описания всех влияющих факторов и учета особенностей предметной области.

Предлагаемая модель используется для формализации знаний по управлению проектами НИР и ОКР РКК «Энергия».

Подход к построению онтологий на основе модели мира Аристотеля

В настоящей работе предлагается модель онтологии мира, названная моделью Аристотеля, который первым сформулировал базовые принципы конструктивной инженерии знаний миров действий [6]:

- **мир** состоит из **объектов**, способных вступать в процессы взаимодействия на основе **законов** мира;

- объекты определяются своими **свойствами**, которые задают способность объектов участвовать в процессах мира;

- сложные объекты состоят из простых, **процессы** состоят из **действий** с объектами;

- сложные объекты строятся из простых объектов путем выполнения **действий** (процессов) над ними для установления **отношений** и связывания простых объектов в сложные;

- **отношения** между объектами могут отражать структурные, функциональные, временные или другие виды связей между ними;

- с каждым объектом мира можно что-то **делать** в любой момент времени (нет тупиковых состояний), но чтобы выполнить действие над объектом, необходимо выполнить определенные условия;

- **события** действий (процессы) изменяют состояния объектов, их свойства и отношения и запускают новые процессы;

- объекты, свойства, процессы (действия) и отношения характеризуются **атрибутами различных типов**, которые имеют диапазоны значений и конкретные значения в заданный момент времени.

Набор состояний объектов конкретного мира с установленными отношениями и развивающимися процессами, остановленными в заданный момент времени, будем называть сценой мира.

Для разработки онтологий и сцен необходимы специализированные инструментальные средства, поддерживающие их создание и редактирование.

Онтология управления проектной деятельностью предприятия

В настоящей работе предлагается онтология предприятия, используемая в ходе проектного управления и позволяющая, с одной стороны, описывать объекты и процессы, особенности задач управления проектами, учитывая структуру предприятия, а также детализировать и накапливать информацию о конкретных проектах компании. С другой стороны, созданная онтология позволяет описывать особенности конкретных сотрудников-исполнителей, их личностные качества, навыки, опыт и другую информацию, которая может быть использована для формирования индивидуальных траекторий обучения специалистов и роста их квалификации. Верхний уровень разработанной онтологии представлен на рис. 1.

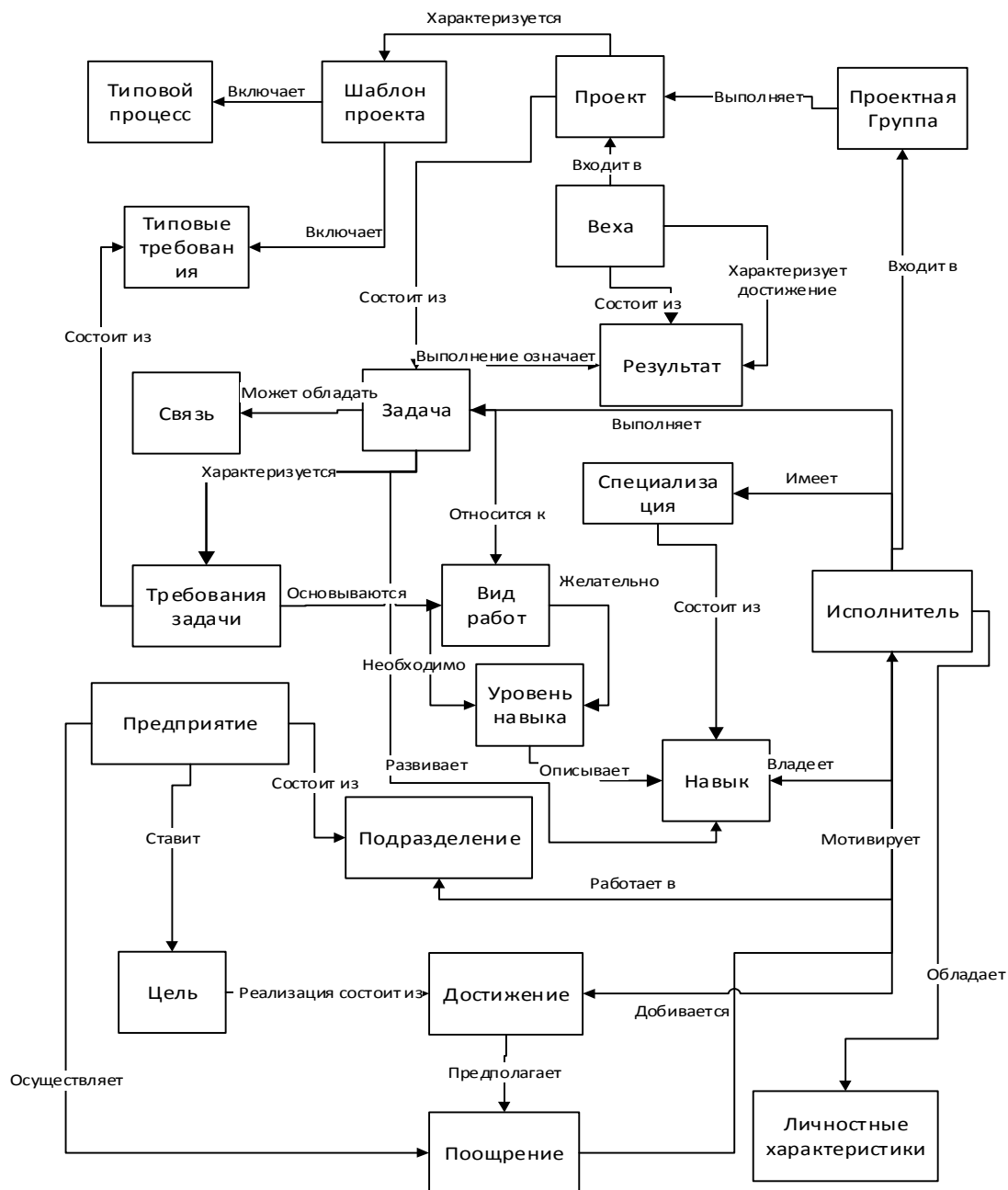


Рис. 1. Верхний уровень онтологии управления проектной деятельностью предприятия

Основным концептом в рамках управления проектами является концепт «Проект», описывающий уникальные свойства проекта. Такими особенностями могут быть цели проекта, предположительная выгода от его осуществления, его важность для предприятия, требования по составу исполнителей. Профиль проекта описывает также ряд ограничений, присущих проекту: ограничения по времени, средствам, ресурсам и т. п. Порядок действий по выполнению проекта характеризуется концептом «Шаблон проекта», включающим в себя концепты «Типовые требования» и «Типо-

вые процессы». Здесь под шаблоном проекта подразумевается устойчивая утвержденная совокупность типовых процессов, под типовым процессом – предопределенная последовательность выполнения задач, а под типовыми требованиями – совокупность базовых требований задач, на которые декомпозируются проекты. Базовые требования, которыми характеризуются задачи, определяются на основе концепта «Виды работ» в соответствии с видами работ, к которым они относятся. В дополнение к базовым требованиям задачи могут обладать индивидуальными требованиями, такими как сроки исполнения, назначение на конкретного исполнителя и т. д.

Одним из основных свойств задачи является способность образовывать взаимосвязи, определяющие порядок выполнения задачи и описываемые концептом «Связь». Выполнение задач приводит к набору следствий, которые описываются концептом «Результат». Определенные совокупности результатов, достигнутых к определенному моменту времени, составляют вехи, характеризующиеся концептом «Веха». Под вехами подразумеваются определенные моменты времени – своеобразные промежуточные дедлайны, ограничивающие этапы выполнения, на которые подразделяется проект. За выполнение проекта отвечают организованные команды или другие объединения сотрудников. В такое объединение может входить неограниченное число сотрудников, при этом каждый из них может состоять в нескольких объединениях и выполнять в них различные роли. Описание списка сотрудников, входящих в такое объединение, и их ролей содержится в концепте «Проектная группа». Сами сотрудники описываются концептом «Исполнитель», который содержит в себе информацию об общих данных исполнителей (дата рождения, образование, контактные данные и т. п.). Профессиональные качества исполнителя описываются с помощью концепта «Специализация», содержащего перечень навыков, которыми обладает исполнитель. Каждая специализация соответствует определенному установленному набору навыков.

Исполнитель, полноценно обладающий несколькими такими наборами, обладает несколькими специализациями. Полное описание каждого навыка в индивидуальном порядке обеспечивается концептом «Навык», который помимо подробного изложения умений, характеризующих данный навык, предоставляет справочную информацию о применении этого навыка исполнителем. Степень развития навыков пользователя описывается концептом «Уровень навыка» и является ключевым значением при определении уровня допуска исполнителя к тем или иным видам работ на предприятии. При этом необходимо учитывать, что в зависимости от изменения критериев стратегии планирования требования к уровню навыков исполнителей могут как повышаться, так и понижаться. Развитие навыков пользователя обеспечивается выполнением задач, относящихся к тем видам работ, для которых требуются эти навыки.

В рамках системы мотивации ориентирование исполнителей на развитие собственных навыков (а равно на увеличение производительности и качества труда) и достижение согласованности целей рабочего процесса является основной задачей предприятия, представленного в онтологии концептом «Предприятие». Предприятие, состоящее из подразделений, в которых работают исполнители, ставит перед собой глобальные стратегические цели, которые декомпозируются на достижения. Под достижениями следует понимать совокупность выполнения исполнителем (или группой исполнителей, если такое предусмотрено) ряда определенных задач и/или процессов. Выполнение исполнителем достижения подразумевает обязательное (в рамках инновационной концепции управления предприятием) поощрение исполнителя, выраженное в предварительно определенной предприятием форме, которое и является основным фактором, мотивирующим исполнителя.

На текущий момент имеется целый ряд инструментальных средств для разработки онтологий, которые позволяют создавать и редактировать концептуальные модели, а также обеспечивают совместный доступ, обмен данными и решают ряд других задач. Наиболее известные конструкторы онтологий представлены в работах [1-5], среди них Protégé, OntoEdit, The ontolingua server и другие. Однако эти редакторы не позволяют реализовать подход к построению онтологий на основе модели мира Аристотеля.

Для реализации данного подхода в настоящее время разрабатывается специализированный инструмент – конструктор онтологий (рис. 2), в котором семантическая сеть «объект – свойство – процесс – отношение – атрибут» позволяет управлять степенью детализации объекта и осуществлять послойную навигацию для удобного и гибкого поиска требуемых концептов.

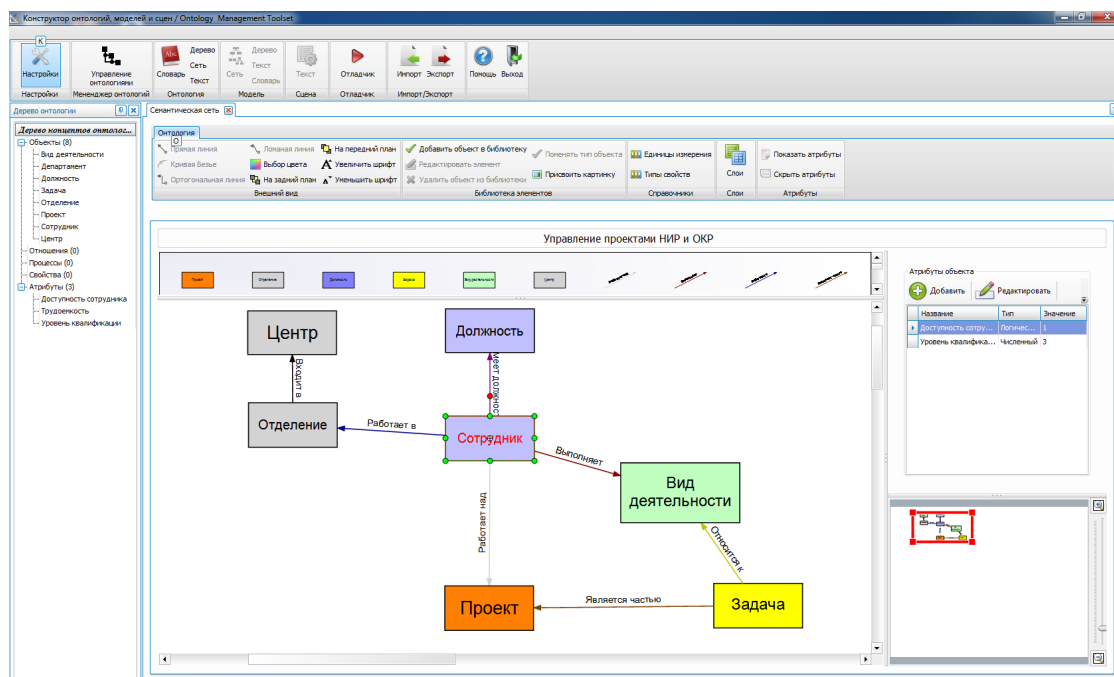


Рис. 2. Экран конструктора онтологий

Представленная онтология является основой для интеллектуальной информационной системы управления проектами НИР и ОКР.

Применение онтологического подхода для управления проектной деятельностью

Знания из онтологии можно использовать на всех уровнях управления в интеллектуальной системе для представления плана работ как сети связанных задач (операций) исполнителей (в будущем – подразделений):

- 1) этап построения плана работ;
- 2) этап исполнения плана;
- 3) контроль и анализ результатов работы.

Построение плана работ для подразделения

Модуль планирования для группы исполнителей (под группой подразумевается

проектная группа или подразделение корпорации) может использовать различные стратегии построения плана, при этом каждая из этих стратегий будет использовать знания из онтологии для формирования оптимального плана:

- выполнить как можно быстрее – задачи будут назначаться на наиболее опытных сотрудников для скорейшего их выполнения;

- выполнить с наибольшей пользой для обучения персонала – задачи будут назначаться так, чтобы сотрудники могли получить наибольшее количество опыта, однако срок выполнения задачи не должен превышать срок, установленный «сверху».

При использовании стратегии обучения на предприятии акцент в назначении задач на исполнителей делается на повышение их текущего уровня квалификации. При этом к видам работ могут допускаться работники, не имеющие доступа к ним при использовании других стратегий. Таким образом, исполнитель, не обладающий необходимым уровнем навыков для решения поставленной задачи, но, тем не менее, выполняющий ее (за больший срок, с меньшим качеством или прибегнув к помощи других сотрудников), развивает необходимые для данного вида работ навыки, в результате чего в будущем сможет выполнять аналогичные задачи на должном уровне в рамках применения других стратегий построения плана.

При построении плана на этом этапе могут быть учтены психологические (личностные) особенности. Например, если человек плохо справляется с монотонной работой (информацию об этом можно ввести в онтологию непосредственно или получить по историческим данным), система может назначать на него подобную работу в последнюю очередь или «разбавлять» однотипные работы в его плане работами другого типа, либо распределять такие задачи равномерно между всеми сотрудниками подразделения/команды проекта.

При повышенной утомляемости сотрудника длительная работа, требующая повышенной концентрации, не планируется непрерывно, а разделяется на несколько последовательных этапов, которые планируются к выполнению по несколько часов в день (в дальнейшем возможен учет биоритмов и других особенностей участников).

Если исполнитель работает над задачами нескольких проектов, система может планировать на него задачи одного проекта последовательно, чтобы исключить слишком частые переключения между различными проектами, причем контекст может быть задан не только проектом, но и другими способами: например, установкой специального атрибута «контекст» для каждой из задач в онтологии.

При использовании онтологии логика планирования может быть расширена без серьезных доработок в программном обеспечении.

Этап исполнения плана

В результате планирования исполнителю назначается набор задач, однако успешное исполнение зависит от большого числа факторов. На данном этапе особенно необходимо использовать интеллектуальный матчинг задач и исполнителей, основанный на специфических знаниях. Для решения данной задачи предлагается использовать систему поддержки исполнения, представляющую собой отдельный персональный планировщик для сотрудника. Основными задачами данного модуля являются:

- возможность своевременной отметки состояния исполнения задач, например, потраченное и оставшееся время на выполнение, текущие проблемы и т. д.;

- возможность декомпозиции поставленных задач, а также хранения и анализа данных шаблонов для последующего использования;

- интерактивное взаимодействие персонального планировщика с пользователем

для выявления проблем и дополнительных ограничений, например: «Я не могу продолжить выполнение задачи, пока не придет письмо с подтверждением»;

– перестроение плана работ исполнителя для наиболее эффективного выполнения, в том числе на основе методик управления временем (GTD и т. п.), – после сложной задачи лучше выполнить более простую или поработать над рутинной задачей;

– использование базы знаний корпорации для решения задачи;

– коррекция плана в соответствии с особенностями исполнителя на основании его профиля и личных установок.

Данный перечень возможностей может быть дополнен или изменен в дальнейшем. Дополнительная логика планирования персонального планировщика будет действовать согласованно с планировщиками групп так, чтобы не нарушить их план и не выйти за срок.

Контроль и анализ результатов работы

На этапе контроля существует ряд задач, в которых использование системы поддержки исполнителей может дать весомый вклад в построение эффективной работы.

Одной из возможных задач является анализ результатов работы исполнителей, набранного ими опыта и достигнутых результатов. Анализ показателей сотрудников и мониторинг динамики получения опыта позволит специалистам по кадрам и руководителям подразделений развивать сотрудников, управлять их мотивацией и отслеживать узкие места. Одним из возможных вариантов стимулирования и мотивации сотрудников является использование механизма достижений. Достижения и правила их фиксации могут быть описаны в онтологии и обработаны в процессе работы системы. Фиксация новых достижений может стать одним из факторов мотивации сотрудников, например материальное поощрение за освоение нового навыка.

С другой стороны, возможна и обратная связь – при использовании онтологического подхода каждый из сотрудников может указывать свои предпочтения и ставить перед собой цели, например повышение заработной платы или построение персональной траектории развития. Если сотрудник заинтересован в обучении, он может выбрать те навыки, которые ему хотелось бы освоить; тогда при согласии руководителя система планирования в режиме обучения будет стараться назначить исполнителю задачи, развивающие интересующие его навыки. База знаний может содержать не только информацию о соответствии требований задач навыкам специалистов, но и дополнительную информацию об обучающих и справочных материалах, которые могут помочь как в работе, так и в развитии интересующих умений и навыков.

Выводы

Рассмотренный в данной работе подход позволяет строить онтологии для создания интеллектуальных систем управления ресурсами организаций, осуществляющих деятельность в области НИР и ОКР, где особенно часто возникают новые сложные задачи и другие важные события.

Принципы использования онтологии как для решения различных задач планирования ресурсов, мониторинга и контроля результатов, так и управления персоналом подтвердили перспективы использования онтологического подхода для управления НИР и ОКР. Предлагаемый подход может быть также эффективно использо-

ван для решения задач моделирования производственных процессов и для планирования управления ресурсами предприятий в реальном времени.

Авторы выражают благодарность Министерству науки и образования РФ, поддержавшему разработки по созданию интеллектуальных систем управления ресурсами предприятий в реальном времени по государственному контракту Минобрнауки РФ № 14.514.11.4005.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Farquhar A., Fikes R., Rice J.* The ontolingua server: A tool for collaborative ontology construction // International Journal of Human-Computer Studies, 46(6), 1997. – P. 707-728.
2. *Musen M.* Domain Ontologies in Software Engineering: Use of Protégé with the EON Architecture // Methods of Inform. in Medicine, 1998. – P. 540-550.
3. *OntoEdit: Collaborative ontology development for the Semantic Web.* Y. Sure, M. Erdmann, J. Angele, S. Staab, R. Studer, D. Wenke // In Proc. of the Inter. Semantic Web Conference (ISWC 2002), Sardinia, Italia, June 2002.
4. *Bechhofer S., Horrocks I., Goble C., Stevens R.* OilEd: A Reason-able Ontology Editor for the Semantic Web // Joint German/Austrian conf. on Artificial Intelligence (KI'01). Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI 2174, Springer-Verlag, Berlin, 2001. – P. 396-408.
5. *Domingue J.* Tadzebao and WebOnto: Discussing, Browsing, and Editing Ontologies on the Web // Proc. of the Eleventh Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management, KAW'98, Banff, Canada, 1998.
6. *Скобелев П.О.* Онтологии деятельности для ситуационного управления предприятиями в реальном времени // Онтология проектирования. – 2012. – № 1(3). – С. 6-38.

Статья поступила в редакцию 26 февраля 2013 г.

DESIGN AND UTILIZATION OF ONTOLOGY FOR INTELLIGENT SYSTEM FOR MANAGEMENT OF RESEARCH AND DEVELOPMENT PROJECTS

E.M. Kleimenova¹, P.O. Skobelev², V.B. Larukhin², D.S. Kosov², E.V. Simonova²

¹ JSC RSC «Energia» after S.P. Korolev
4A, Lenin st. Korolev, Moscow area, 141070

² «SEC «Smart Solutions»»,
17, Moscovskoe Shosse, Samara, 443013

The principles of designing the specialized ontology for management of enterprise research and development projects are described in the paper. The examples of using the ontological approach for managing the employees' activity at different project execution stages are given.

Keywords: *Aristotle universe model, domain ontology, enterprise project activity management.*

*Elena M. Kleimenova, Postgraduate Student.
Petr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Vladimir B. Larukhin, Postgraduate Student.
Daniil S. Kosov, analyst.
Elena V. Simonova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

СТРУКТУРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ РАСПЛАВА ПОЛИМЕРА В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОЧЕРВЯЧНОГО ЭКСТРУДЕРА

А.С. Нечаев, В.Н. Митрошин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Осуществлено структурное моделирование распределенной системы автоматического управления температурой расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера как объектом с распределенными параметрами при воздействии распределенных возмущающих воздействий. На основании этого синтезирована и отлажена численная модель данной системы, получены ее переходные характеристики.

Ключевые слова: *экструдер, зона дозирования, температура расплава полимера, распределенное управление, моделирование.*

Управление сложными многооперационными процессами в настоящее время вызывает большой интерес специалистов в различных отраслях промышленности. Это, в первую очередь, связано с необходимостью повышения конкурентоспособности изготавливаемой продукции вследствие улучшения ее качества, что непременно ведет к ужесточению требований, предъявляемых к технологическим параметрам производства изделия. Все вышесказанное в полной мере относится к производству токопроводящих кабелей связи.

Важнейшим этапом производства кабелей связи является наложение полимерной изоляции на токопроводящую жилу, которое осуществляется экструзионным методом. Именно в ходе данного процесса формируются основные эксплуатационные показатели кабеля как канала связи.

Процесс изолирования можно представить в виде совокупности различных функциональных участков, таких например, как участок транспортировки гранул полимера до загрузочной зоны экструдера, участок плавления полимера, участок отжига токопроводящей жилы, участок наложения полимерной массы на отожженную жилу, участок охлаждения кабеля и другие. Такая совокупность представляет собой многосвязную систему, направленную на достижение поставленной задачи, а именно получение кабеля связи как продукта высокого качества. Поэтому работа участков должна быть согласованна и оптимизирована по выбранному критерию качества, что невозможно осуществить без помощи систем автоматического управления технологическими параметрами процесса.

Одним из ключевых участков в процессе наложения изоляции является зона дозирования экструдера, на выходе которой расплав полимера должен обладать температурой, заложенной технологическими требованиями. Согласно источникам [1 – 3],

Работа проведена с использованием оборудования ЦКП «Исследование физико-химических свойств веществ и материалов» Самарского государственного технического университета при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Александр Сергеевич Нечаев, аспирант.

Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

именно температура расплава полимера на выходе зоны дозирования влияет на формирование диаметра и диэлектрической проницаемости изоляции, а следовательно, и на погонную емкость кабеля, что особенно значимо при изготовлении высокочастотных кабелей.

Для построения оптимальной в некотором смысле системы автоматического управления (САУ) температурой расплава полимера в зоне дозирования необходимо иметь модель данного объекта, отражающую основные особенности реального объекта.

Анализ источников показал, что основными особенностями рассматриваемого объекта являются неравномерное распределение температуры вдоль канала шнека экструдера и наличие внутренних источников тепла, вызванных температурной аномалией вязкости и циркуляционно-поступательным течением расплава в канале. Для учета этих особенностей следует рассматривать данный объект как объект управления с распределенными параметрами (ОРП). Такое представление объекта с учетом некоторых допущений, не искажающих описания поведения объекта, но существенно упрощающих математическую модель, осуществлено авторами в работе [4], в которой найдена передаточная функция $W_p(z, p) = T_p(z, p) / T_u(z, p)$, где $T_p(z, p)$ – температура расплава полимера, $T_u(z, p)$ – температура цилиндра на границе металл/полимер, z – продольная координата канала шнека.

Исходя из физики процесса конвективного нагрева при моделировании САУ температурой расплава необходимо принимать во внимание инерционность процесса передачи тепла от нагревателя к полимеру. С учетом геометрических и теплофизических параметров цилиндра экструдера была получена передаточная функция $W_u(z, p) = T_n(z, p) / T_u(z, p)$ (здесь $T_n(z, p)$ – температура нагревателя), в первом приближении описывающая процесс прохождения теплового потока от нагревателя к расплаву через стенку цилиндра в виде передаточной функции типового аperiodического звена первого порядка.

При наложении кабельной изоляции в цеховых условиях нельзя не учитывать влияние на систему различных возмущающих факторов, которые носят случайный характер и могут быть вызваны, например, изменением температуры окружающей среды, изменением марки загружаемого полимера в процессе изолирования и т. п. Данное воздействие ($w_g(z, p)$) также изменяется не только с течением времени, но и имеют пространственную распределенность, которую можно представить в форме произведения двух функций, одна из которых зависит только от времени ($\mathfrak{G}_g(\tau)$), а другая – только от пространственного распределения ($\varphi_g(z)$) [5]. В структурной схеме функцию, зависящую от времени, представим в операторном виде $\mathfrak{G}_g(p)$.

Построение САУ по принципу отклонения между задающим сигналом $U_3(\hat{z}, p)$ и сигналом текущего значения управляемой величины $U_{oc}(\hat{z}, p)$ (сигналом обратной связи) позволяет рассматривать систему как одноконтурную с сосредоточенным регулятором, имеющим передаточную функцию $W_{pec}(p)$. Это справедливо для данного процесса, поскольку задающий сигнал представляет собой сосредоточенное воздействие, а сигнал обратной связи формируется термодатчиком (в большинстве случаев термопарой) и также является сосредоточенной величиной. На выходе регулятора образуется сосредоточенное управляющее воздействие $\mathfrak{G}_y(p)$, которое в произведении с передаточной функцией $\varphi_y(z)$, характеризующей пространственное рас-

пределение управляющего воздействия по всей длине нагревателя, формирует управляющее воздействие $w_y(z, p)$ на рассматриваемый ОРП.

При построении системы управления ОРП необходимо иметь представление об управляемости и наблюдаемости данного объекта [6].

В случае управления температурным полем расплава на выходе зон нагрева данный ОРП является управляемым, поскольку по технологии процесса нагрева полимера в экструдере возможно выбрать такое управляющее воздействие, которое в допустимых пределах способно при наличии внешних возмущений перевести объект из некоторого начального состояния в требуемое конечное.

Что касается условия наблюдаемости, а именно необходимости получения полной информации о функции выхода рассматриваемого объекта, то для нашего случая это представляется выполнимым, т. к. обусловлено наличием циркуляционного течения полимера в канале шнека, что делает расплав однородным по всему сечению, вследствие чего достаточно измерить температуру на выходе зоны нагрева одним датчиком.

Стоит отметить, что большинство экструзионных установок, применяющихся при переработке полимеров, позволяют вести управление двумя последними нагревателями зоны дозирования, однако ввиду сложности настройки одновременно двух регуляторов на практике чаще всего управляют только мощностью последнего нагревателя. В ряде случаев такой подход не позволяет обрабатывать возмущения, действующие на весь процесс нагрева полимера. Регулирование температуры расплава двумя зонами нагрева позволяет сократить ряд таких случаев ввиду увеличения длины канала шнека, где ведется регулирование, а следовательно, и времени регулирования, что позволяет системе успевать обработать влияющие на нее возмущения.

С учетом вышесказанного была построена структурная схема САУ данным ОРП (рис. 1).

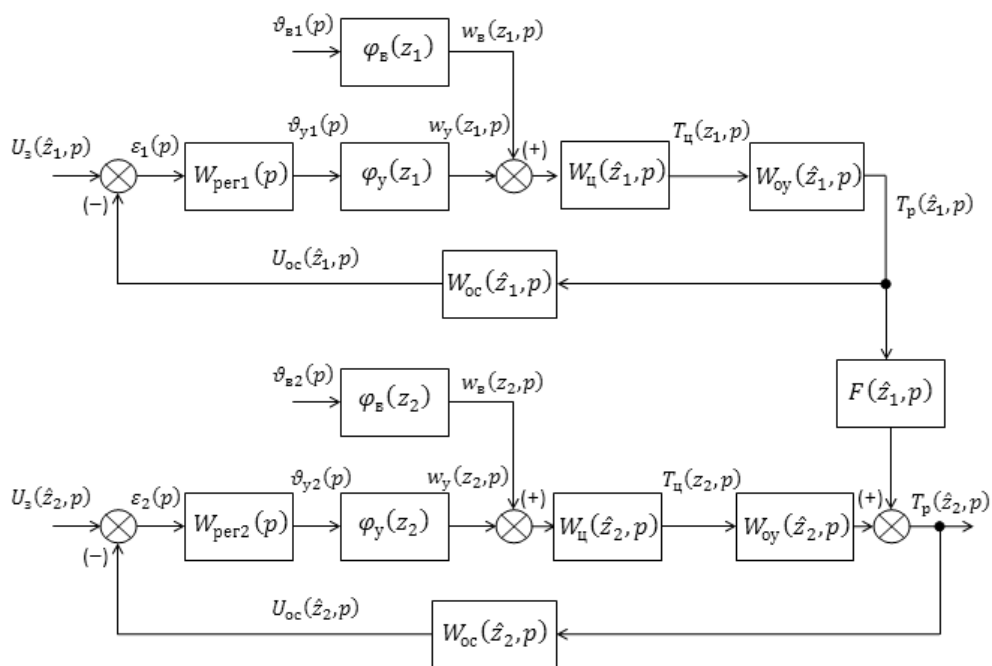


Рис. 1. Структурная схема САУ температурой расплава полимера с регулированием двух зон нагрева

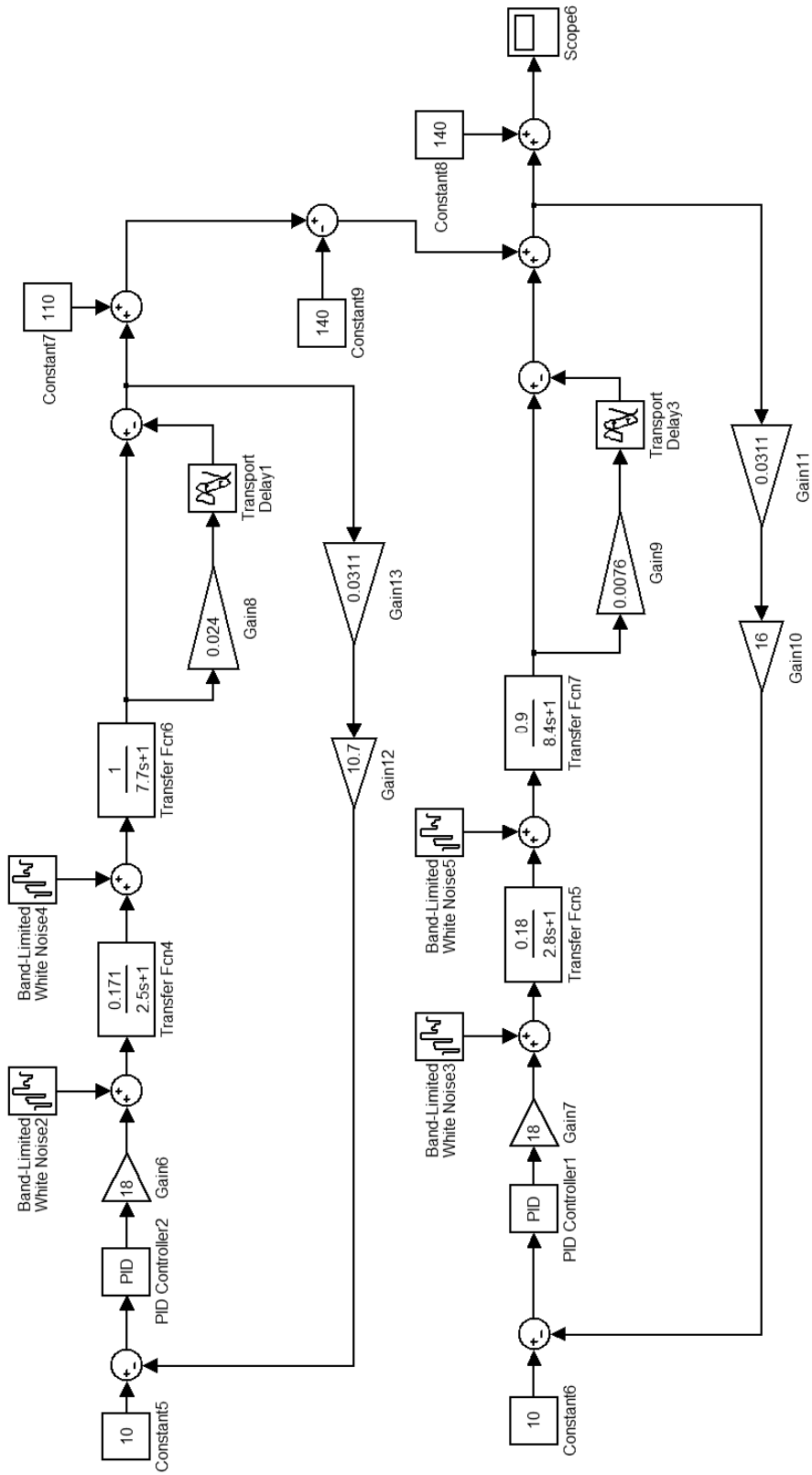


Рис. 2. Модель системы автоматического регулирования температуры расплава полимера с контролем двух последних зон нагрева цилиндра экструдера NOKIA-80

В схеме воздействия и блоки с индексом 1 описывают САУ рассматриваемого ОРП в зоне первого управляемого нагревателя со стороны загрузочной зоны экструдера, воздействия и блоки с индексом 2 – второго нагревателя. Величина $T_u(z, p)$ характеризует изменение температуры цилиндра у границы цилиндр/полимер. Величина $T_p(\hat{z}, p)$ определяет изменение температуры полимера на выходе зоны нагрева какого-либо из нагревателей и является скалярным выходом системы, контролируемым только в одной пространственной точке \hat{z} . Функция $F(\hat{z}_1, p)$ характеризует связь между выходной величиной ОРП первой зоны нагрева и выходной величиной второй зоны нагрева. Данная связь непременно должна входить в замкнутый контур регулирования второго нагревателя, что позволяет компенсировать отклонения выходной величины первого контура и соблюдать физику процесса изолирования методом экструзии.

С помощью полученной структурной схемы было проведено численное моделирование САУ температуры расплава полиэтилена низкой плотности в зоне дозирования одночервячного экструдера марки *NOKIA-80*. Анализ системы был осуществлен с использованием пакета *MatLab Simulink*. Модель данной системы приведена на рис. 2.

Все численные значения параметров ОРП были получены с учетом реологических особенностей расплава полимера, геометрии частей экструдера в зоне дозирования, а также технологических требований, предъявляемых к нагреву полиэтилена. Последние требования позволили задаться граничными и начальными условиями для рассматриваемого ОРП, что принципиально важно для решения данного класса задач.

В качестве распределенных возмущающих внешних воздействий были заданы случайные ступенчатые функции, влияющие соответственно на мощность нагревателей ($w_{в1}$ на рис. 3) и на расплав полимера в зоне нагрева ($w_{в2}$). Представленные возмущающие воздействия моделируют резкие перепады напряжения питания на нагревателе, перепады температуры окружающей среды, изменение характеристик полимера и т. п. Выбор данных функций возмущения мотивирован тем, что худший вариант влияния возмущения на объект при регулировании наблюдается в том случае, когда оно наступает внезапно или за очень короткий промежуток времени. В этом случае система регулирования может не успеть отработать поступившее возмущение.

Для регулирования мощности, подаваемой на нагреватели, в схему были введены ПИД-регуляторы. Параметры ПИД-регуляторов находились с помощью метода CHR (Chien, Hrones и Reswick) исходя из условий максимально быстрого нагрева расплава полимера в первой зоне нагрева с возможностью перерегулирования и быстрого вывода температуры на необходимый уровень без эффекта перерегулирования во второй зоне нагрева. Такой подход позволяет расплаву полимера быстрее достичь необходимой температуры, не вызывая эффекта спекания пластмассы вблизи стенок цилиндра экструдера, а также помогает избежать излишнего разложения порофора при наложении пористой изоляции.

Переходная характеристика данной системы с возмущающими воздействиями приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что время переходного процесса данной системы составляет порядка 10 с, а также то, что регуляторы справляются с поданными на объект возмущениями, не допуская изменения температуры расплава полимера на выходе зоны дозирования больше 1°C , что является приемлемым результатом для изолирования высокочастотных кабелей связи.

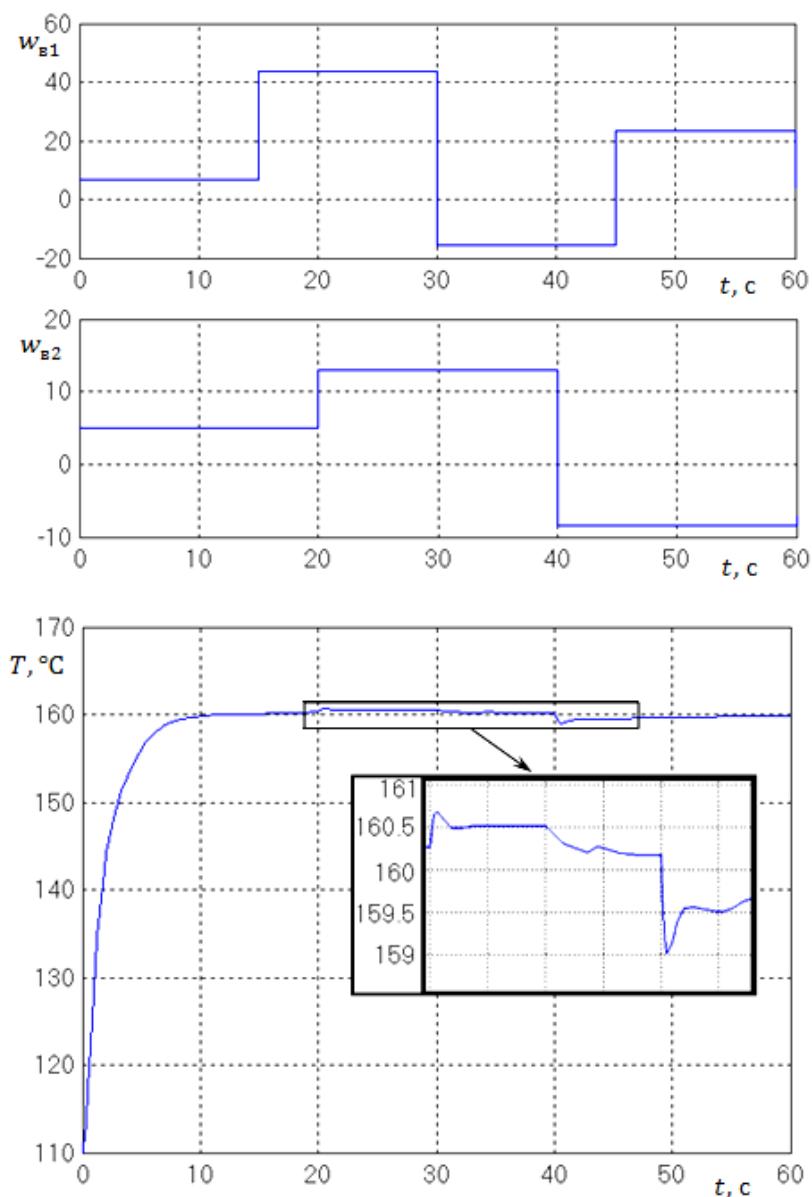


Рис. 3. График переходного процесса полученной системы автоматического регулирования температуры расплава полимера в зоне дозирования при управлении двумя последними зонами нагрева

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
2. Вишняков Е.М., Хвостов Д.В. Производство кабелей связи и конформные отображения // КАБЕЛЬ-news. – 2010. – № 2. – С. 54-60.
3. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физ.-мат. науки. – 2008. – № 1 (16). – С. 113-118.
4. Митрошин В.Н., Нечаев А.С. Математическая модель течения расплава полимера в зоне дозиро-

- вания одночервячного экструдера как объекта с распределенными параметрами // Ползуновский вестник. Измерение, контроль, информатизация: проблемы и перспективы технологий разработки и применения. – 2012. – № 3/2. – С. 13-16.
5. *Ранопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
 6. *Ранопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005. – 292 с.

Статья поступила в редакцию 21 января 2013 г

STRUCTURAL AND NUMERICAL MODELING OF DISTRIBUTED CONTROL OF THE POLYMER MELTING TEMPERATURE IN A ZONE OF ONE-WORM EXTRUDER DISPENSING

A.S. Nechaev, V.N. Mitroshin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

A structural modeling of distributed system that may automatically control the temperature of the polymer melting in the metering zone of one-worm extruder as an object with distributed parameters under the distributed disturbances influence is given in the paper. Based on that a numerical model of the system has been synthesized and debugged, and its transient response is received.

Keywords: *extruder, metering zone, the temperature of the polymer melt, distributed control, modeling.*

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИЗОЛИРОВАНИЯ ЖИЛЫ КАБЕЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Б.К. Чостковский, В.С. Головки

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассматривается задача математического и имитационного моделирования первичных параметров медной жилы с пористой изоляцией, которая формируется при изолировании методом экструзии на технологической линии, оснащенной датчиками и системами автоматической стабилизации диаметра изоляции и погонной емкости изолированной жилы.

Ключевые слова: LAN-кабель, имитационное моделирование, корреляционно-спектральный анализ.

Проводные каналы связи организуются на основе направляющих систем, в качестве которых используются двухпроводные цепи, коаксиальные или симметричные. Первичные и вторичные параметры передачи и параметры взаимных влияний кабелей связи определяются геометрическими и электрическими параметрами изолированной жилы, являющейся основой двухпроводной цепи, например витой пары кабеля передачи данных (LAN-кабеля).

Цель управления – автоматическая стабилизация диаметра изоляции и степени пористости, определяющей относительную диэлектрическую проницаемость изоляции ε_n , при обеспечении таких вероятностных характеристик динамических ошибок управления, которые минимизируют уровень отражений и переходных влияний, передаваемых по кабелю электрических сигналов [1].

Вариации измеряемой на «проход» погонной емкости изолированной жилы определяются вариациями диаметра и относительной диэлектрической проницаемости изоляции по длине кабеля x :

$$C_n(t) = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D_n(t)}{d}} \cdot \varepsilon_n(t) \approx C_0 + K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon_n(t) + K_D \cdot \Delta D_n(t), \quad (1)$$

где $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\Phi \cdot \text{м}^{-2}$; $x = v_n t$; v_n – скорость изолирования, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; C_0 – заданное номинальное значение погонной емкости, $\Phi \cdot \text{м}^{-1}$.

Необходимо отметить малую погрешность линеаризации (1), обусловленную малостью вариаций $\Delta\varepsilon_n(t)$ и $\Delta D_n(t)$, которые определяются динамическими ошибками соответствующих контуров локальных систем автоматической стабилизации.

Из (1) видно, что практически независимую от вариаций D_n сглаженную оценку вариаций диэлектрической проницаемости $\overline{\Delta\varepsilon_n}$ можно получить, усредняя измеряемую «на проход» величину $\Delta C_n(t)$ на интервале времени T :

Борис Константинович Чостковский (д.т.н.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Валерия Сергеевна Головки, студентка.

$$\begin{aligned}\Delta\overline{C}_n(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \Delta C_n(t) dt \approx \frac{K_\varepsilon}{T} \int_{t-T}^t \Delta\varepsilon_n(t) dt + \frac{K_D}{T} \int_{t-T}^t \Delta D_n(t) dt \approx \\ &\approx \frac{K_\varepsilon}{T} \int_{t-T}^t \Delta\varepsilon_n(t) dt = K_\varepsilon \Delta\overline{\varepsilon}_n(t).\end{aligned}\quad (2)$$

Второе слагаемое в (2) отброшено из-за его малости при выборе времени сглаживания T много больше интервала корреляции стационарного случайного процесса $\Delta D_n(t)$, который формируется как ошибка управления контура стабилизации диаметра изоляции. Величину $\Delta\overline{C}_n(t)$ можно рассматривать как оценку вариаций относительной проницаемости пористой изоляции, которая определяется степенью пористости изоляции, зависящей от соотношения объемов, составляющих изолирующий слой газовых включений и сплошного полимера [2]:

$$\varepsilon_n = \frac{1 + m_1 S_n}{1 + m_2 S_n}, \quad (3)$$

где S_n – объемная плотность пористой изоляции, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$$m_1 = 0,923 \cdot 10^{-3}, \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^3;$$

$$m_2 = 0,200 \cdot 10^{-3}, \text{кг}^{-1} \cdot \text{м}^3$$

Согласно (3) среднему значению плотности изоляции в $0,43 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответствует среднее значение относительной диэлектрической проницаемости 1,53.

Источником погрешности оценки (2) является то обстоятельство, что датчик диаметра изоляции расположен на некотором расстоянии от расположенного в ванне охлаждения чувствительного элемента датчика погонной емкости, и это приводит к запаздыванию сигнала диаметра на время τ_D . Поэтому если выражение (1) представить в виде алгоритма косвенной оценки вариации диэлектрической проницаемости

$$\Delta\hat{\varepsilon}_n(t) = \frac{1}{K_\varepsilon} [\Delta C_n(t) - K_D \cdot \Delta D_n(t)] = K_1 [\Delta C_n(t) - K_2 \cdot \Delta D_n(t)], \quad (4)$$

то сдвиг сигнала датчика диаметра приводит к погрешности

$$\delta(t) = \Delta\hat{\varepsilon}_n'(t) - \Delta\hat{\varepsilon}_n(t) = K_1 K_2 [\Delta D_n(t) - \Delta D_n(t + \tau_D)], \quad (5)$$

где $\Delta\hat{\varepsilon}_n'(t)$ – оценка диэлектрической проницаемости с учетом сдвига сигнала датчика диаметра.

Корреляционная функция данной погрешности

$$R_\delta(\tau) = M[\delta(t) \cdot \delta(t + \tau)] = K_1 K_2 [2R_D(\tau) - R_D(\tau + \tau_D) - R_D(\tau - \tau_D)], \quad (6)$$

где R_D – корреляционная функция диаметра изоляции.

Дисперсия погрешности

$$D_\delta = R_\delta(0) = 2K_1^2 K_2^2 [R_D(0) - R_D(\tau_D)]. \quad (7)$$

При заданной дисперсии погрешности выражение (7) позволяет определить допустимый сдвиг сигналов $\Delta C_n(t)$ и $\Delta D_n(t)$ и соответствующее максимально допустимое расстояние между датчиками.

Согласно построенной ранее стохастической модели нерегулярного кабеля связи эксплуатационные характеристики качества кабеля могут быть оценены по извест-

ным функциям спектральных плотностей частных параметров качества, влияющих на обобщенный показатель качества [1].

Эти же спектральные плотности частных параметров качества могут быть использованы для имитационного моделирования процессов формирования частотных характеристик кабеля в ходе технологического процесса его производства.

Определим модели спектральных характеристик параметров изолированной жилы. Корреляционная функция погонной емкости

$$\begin{aligned} R_C(\tau) &= M\{\overset{\circ}{C}_н(t) \cdot \overset{\circ}{C}_н(t+\tau)\} = \\ &= M\{[K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon_н(t) + K_D \cdot \Delta D_н(t)] \cdot [K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon_н(t+\tau) + K_D \cdot \Delta D_н(t+\tau)]\} = \\ &= K_\varepsilon^2 \cdot R_\varepsilon(\tau) + K_D^2 \cdot R_D(\tau) + 2K_\varepsilon \cdot K_D \cdot L_{\varepsilon D}(\tau), \end{aligned} \quad (8)$$

где $R_\varepsilon(\tau)$ – корреляционная функция диэлектрической проницаемости;

$R_D(\tau)$ – корреляционная функция диаметра изоляции;

$L_{\varepsilon D}(\tau)$ – четная составляющая взаимной корреляционной функции диэлектрической проницаемости и диаметра изоляции.

Подвергнув корреляционную функцию (8) преобразованию Фурье, получим необходимую спектральную плотность погонной емкости жилы с пористой изоляцией:

$$S_C(\omega) = K_\varepsilon^2 S_\varepsilon(\omega) + K_D^2 S_D(\omega) + 2K_\varepsilon K_D \cdot C_{\varepsilon D}(\omega), \quad (9)$$

где $S_\varepsilon(\omega)$ – спектральная плотность диэлектрической проницаемости;

$S_D(\omega)$ – спектральная плотность диаметра изоляции;

$C_{\varepsilon D}(\omega)$ – синфазный спектр взаимной спектральной плотности.

На экструзионной линии ТЕР-35 в режиме нормальной эксплуатации при изолировании провода ТПшП-0,5-0,84 были зарегистрированы реализации сигналов штатных датчиков линии. Экспериментальные данные были предоставлены Самарским кабельным заводом.

На рис. 1 показаны реализации диаметра и емкости изоляции. Используются реализации в нормированном виде.

Видно, что реализации емкости и диаметра имеют достаточно сильную корреляцию. Из этого следует, что вариации емкости изоляции преимущественно обусловлены вариациями ее диаметра. Влияние же вариаций диэлектрической проницаемости накладываемой пористой изоляции, появляющихся при изменении степени пористости, невелико и преимущественно сказывается в области нижних частот. Это подтверждается и весьма близким характером оценок корреляционных функций погонной емкости изолированной жилы и диаметра изолирующего слоя (рис. 1). Масштабы по оси ординат безразмерно одинаковы и могут быть определены по величине дисперсии диаметра изоляции, которая равна $0,012 \text{ мм}^2$.

Вид взаимной корреляционной функции отражает то обстоятельство, что увеличение диаметра изоляции приводит к уменьшению ее погонной емкости (рис. 1).

Сравнивая оценки спектральной плотности емкости и вклада диаметра в емкость, можно сделать вывод, что данные оценки не имеют существенных различий. Несущественная разница между ними обусловлена влиянием диэлектрической проницаемости $\varepsilon_н$.

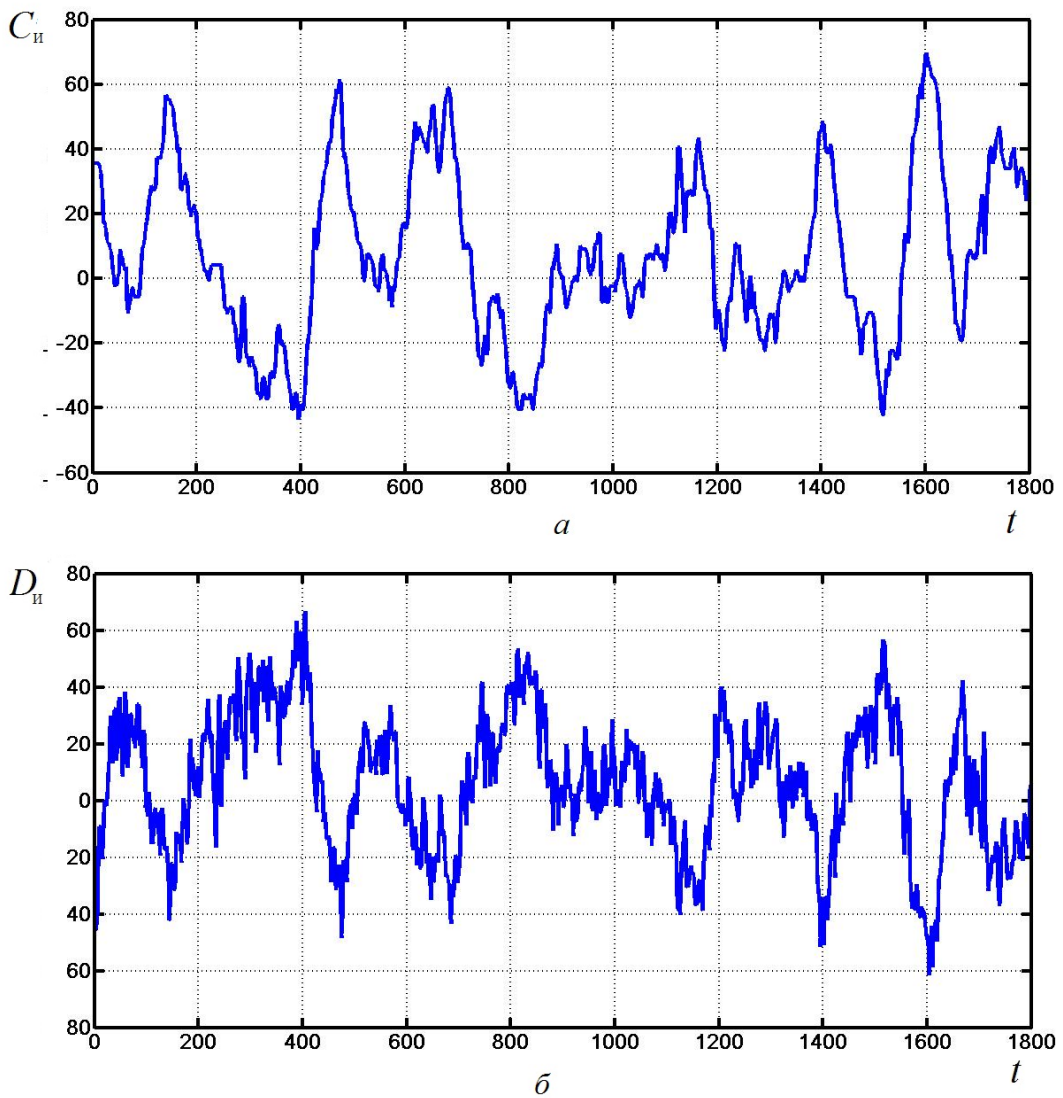


Рис. 1. Экспериментально снятые реализации:
a – погонная емкость $C_{и}(t)$ изолированной жилы; *б* – диаметр изоляции $D_{и}(t)$

Рассчитаем вклад диаметра в емкость в частотной области:

$$S_C^D(\omega) = \gamma_{CD}^2(\omega) \cdot S_C(\omega); \quad (10)$$

$$S_C(\omega) = S_C^E(\omega) + S_C^D(\omega), \quad (11)$$

где $\gamma_{CD}^2(\omega)$ – функция когерентности погонной емкости и диаметра изоляции.

Найдем вклад проницаемости в емкость:

$$S_C^E(\omega) = S_C(\omega) - S_C^D(\omega). \quad (12)$$

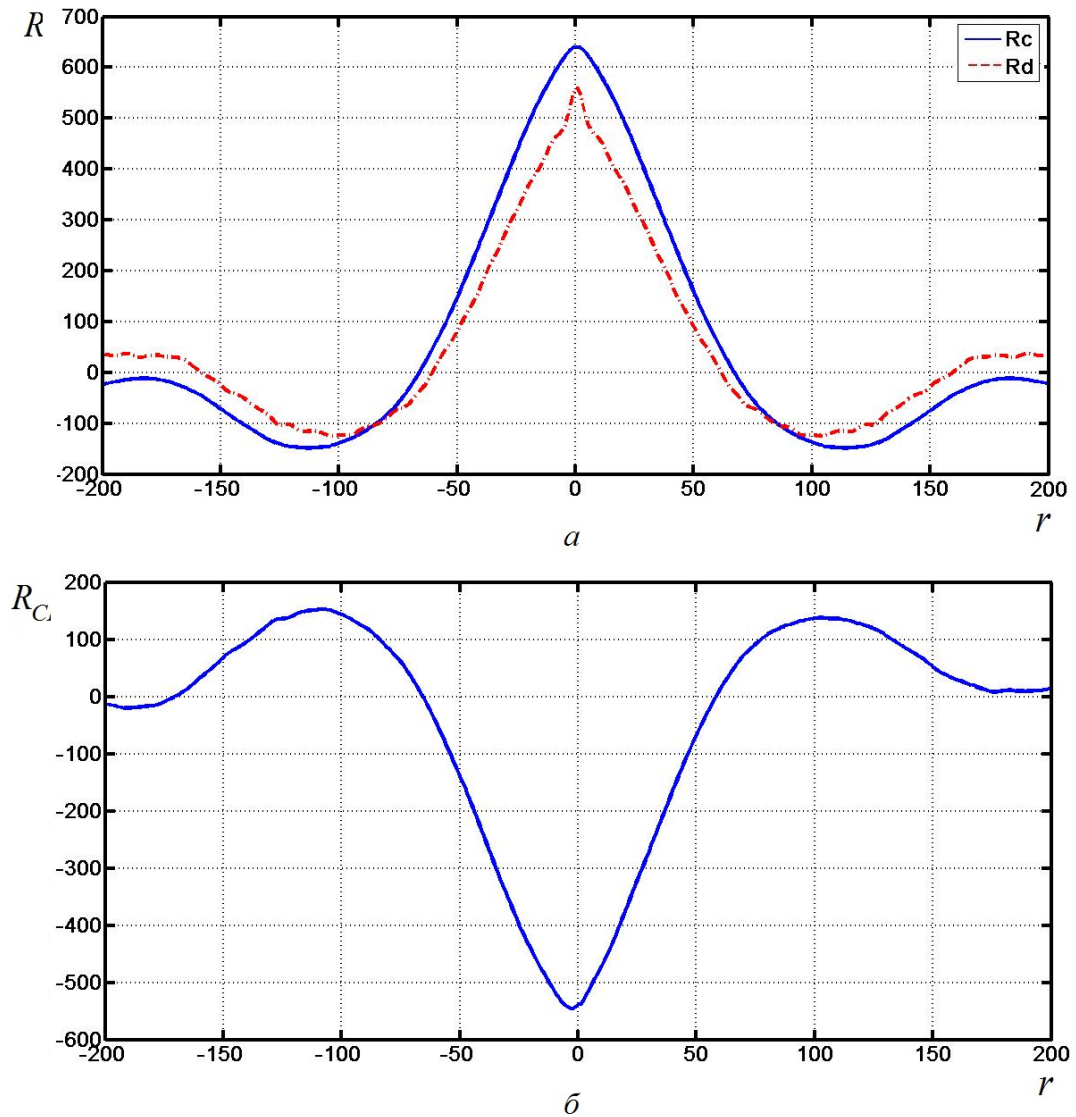


Рис. 2. Оценки корреляционных функций:
 a – оценки корреляционных функций емкости и диаметра; b – оценка взаимной корреляционной функции емкости и диаметра

Из оценок корреляционных функций и спектральных плотностей видно, что основная часть дисперсии диаметра изоляции обусловлена почти периодическими колебаниями диаметра изоляции. Можно предположить, что данный эффект возник из-за автоколебательного характера неудачно настроенного регулятора контура стабилизации диаметра изоляции.

Вычисляем односторонние спектральные плотности с использованием прямоугольного корреляционного окна по формуле

$$S_X^0(f) = 2S_X(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau = 4 \int_0^{\infty} R_X(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau; f \in (0, \infty), \quad (13)$$

где $S_X(f)$ – двухсторонняя спектральная плотность.

Для получения smoothed оценки предполагается использование корреляцион-

ного окна $k(\tau)$: прямоугольного окна, треугольного окна (Бартлетта) или окна Тьюки (приподнятый косинус). Желателен выбор оптимальной формы корреляционного окна. Некоторое предпочтение можно отдать выбору окна Тьюки [3].

Оценка спектральной плотности, сглаженная корреляционным окном, определяется выражением [3, 5]

$$S_X^0(i) = 4T_0 \sum_{r=0}^{m-1} k_X(r) R_X(r) \cdot \cos 2\pi \frac{1}{2m} ir, \quad (14)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, m$ – номер гармоники, соответствующей максимальной частоте f_{\max} и равной половине ширины корреляционного окна, выраженной в тактах T_0 ; r – дискретный отсчет корреляционной функции.

Рассмотрим процедуру сглаживания оценки спектральной плотности на примере емкости изоляции. На рис. 3 показан для сравнения пример сглаживания оценки спектральной плотности с помощью прямоугольного окна и окна Тьюки. Для наглядности приведены графики спектральных плотностей в логарифмическом масштабе по оси абсцисс, что обеспечивает лучшую проработку графика на высоких частотах.

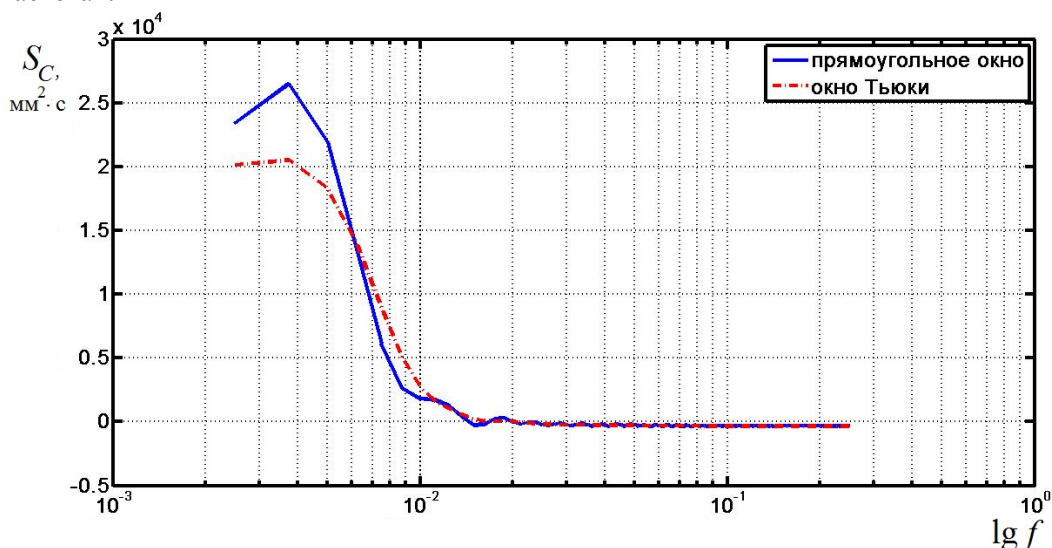


Рис. 3. Сглаживание оценки спектральной плотности емкости окном Тьюки

При использовании прямоугольного корреляционного окна происходит просачивание мощного низкочастотного пика спектра в боковые лепестки спектрального окна, что приводит к появлению случайных периодически повторяющихся пиков оценки спектра на высоких частотах.

Применение корреляционного окна позволяет устранить этот недостаток: оно практически не изменяет форму графика спектральной плотности на низких частотах, но сглаживает все выбросы на высоких частотах, которые вызваны случайными ошибками. Таким образом, сглаживание дает положительный результат: сглаженная оценка положительна на всех частотах.

Можно сделать вывод, что на оценку спектральных характеристик влияет не столько тип выбранного окна, сколько его ширина. Оптимального результата можно добиться, если использовать ширину корреляционного окна в 5-10 % общего числа дискретных отсчетов реализации.

В итоге произведена оценка функции когерентности (15). Данная функция отражает степень линейной взаимосвязи гармонических компонент рассматриваемых процессов. Чем ближе функция когерентности к единице на данной частоте f , тем ближе к единице доля вклада вариаций диаметра изоляции в вариации ее емкости на соответствующей частоте.

$$\gamma_{CD}^2(\omega) = \frac{|S_{CD}(\omega)|^2}{S_{CD}(\omega)S_{CD}(\omega)} = \frac{C_{CD}^2(\omega) + Q_{CD}^2(\omega)}{S_C(\omega)S_D(\omega)}, \quad (15)$$

где $C_{CD}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} L_{CD}(\tau) \cos \omega\tau d\tau$ – синфазный спектр;

$Q_{CD}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} M_{CD}(\tau) \sin \omega\tau d\tau$ – квадратурный спектр;

L_{CD} – четная составляющая взаимной корреляционной функции;

M_{CD} – нечетная составляющая взаимной корреляционной функции.

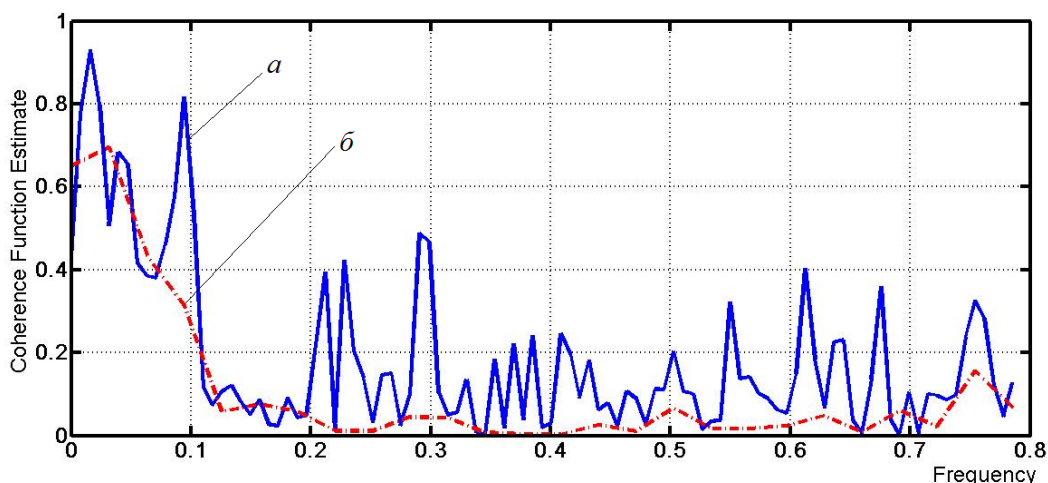


Рис. 4. Функция когерентности:
 a – с шириной окна $m = 200$; b – с шириной окна $m = 50$

На рис. 4 сравниваются оценки функции когерентности с разной шириной корреляционного окна. Уменьшение ширины корреляционного окна делает характеристики более сглаженными, поэтому функция когерентности с уменьшенной шириной корреляционного окна обладает меньшими случайными ошибками. Можно сделать вывод, что на низких частотах гармонические компоненты емкости и диаметра максимально взаимосвязаны.

Для имитационного моделирования и эмпирической оптимальной настройки систем автоматического управления на имитационных моделях возможны различные пути.

Во-первых, возможна аналитическая аппроксимация полученных корреляционно-спектральных оценок с целью расщепления и получения моделей формирующих фильтров [3, 5].

Во-вторых, возможна аппроксимация оценок спектральной плотности как квадрата амплитудно-частотной характеристики цифрового фильтра [4].

Предпочтительным представляется путь эмпирической настройки параметров

модели формирующего цифрового фильтра на получение функции квадрата амплитудно-частотной характеристики фильтра, наиболее близкой к кривой эмпирической оценки спектральной плотности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чостковский Б.К.* Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
2. *Сажин Б.И.* Электрические свойства полимеров. – М.: Химия, 1970. – 224 с.
3. *Чостковский Б.К.* Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами: Учеб. пособие. – Самара: СамГТУ, 2005. – 134 с.
4. *Чостковский Б.К., Волков С.А.* Математические методы в задачах оптимизации стохастических систем: Учеб. пособие. – Самара: СамГТУ, 2007. – 72 с.
5. *Бендат Д., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2013 г.

STATISTICAL MODEL OF THE INSULATION PROCESS OF THE DATA TRANSMISSION CABLE CORD

B.K. Chostkovsky, V.S. Golovko

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

In the paper a problem of mathematical and imitation simulation of primary parameters of copper cord with porous insulation is considered. It is formed during insulating by extrusion method at any technologic line equipped with sensors and systems of self-regulation of insulation diameter and insulated cord unit-length capacitance.

Keywords: LAN cable, imitation simulation, correlation and spectral analysis.

*Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.), Professor.
Valeriya S. Golovko, Student.*