

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 4

2008

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

<i>Зинкин С. А.</i> Элементы технологии иерархического концептуального моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных	3
<i>Дубинин В. Н., Вяткин В. В.</i> Графотрансформационный подход к синтезу формальных моделей систем функциональных блоков ИЕС 61499	16
<i>Леохин Ю. Л.</i> Анализ информационной структуры корпоративной сети	27
<i>Сафонова И. Е.</i> Методы формирования и принятия проектных решений в системах автоматизированного проектирования корпоративных компьютерных сетей	41
<i>Ерыпалова М. Н., Беккер В. Ф., Затонский А. В., Кирич Ю. П.</i> Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний	50
<i>Мещеряков В. А., Суровицкая Г. В., Чугунова В. В.</i> Система диагностики системы менеджмента качества стратегического уровня управления университетом	58
<i>Слепцов Н. В., Щербакова С. В.</i> Повышение качества эволюционно-генетических вычислений с помощью разделения оценки и масштабирования	67

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

<i>Макеева Г. С., Голованов О. А., Савченкова М. В.</i> Математическое моделирование и электродинамический расчет эффективных параметров магнитных наноматериалов	80
<i>Ашанин В. Н., Баулин И. С.</i> СТ-АЦП с промежуточной интегрально-импульсной модуляцией	86
<i>Бойков И. В., Тарасов Д. В.</i> Применение гиперсингулярных интегральных уравнений к численному моделированию электрического вибратора	94

Башикиров О. В., Першенков П. П., Тюрин Е. А.	
Исследование возможности измерения частоты электросети методом «трех мгновенных значений сигнала»	107
Журавлев С. П., Журавлев П. П. Построение интеграционных связей в комплексной системе безопасности	116

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Вайнер Н. И., Тутарова В. Д. Моделирование теплообмена при непрерывной разливке стали с применением внутренних охладителей	126
Тарасенко Ю. П., Бердник О. Б., Царева И. Н., Кривина Л. А. Разрушение рабочих лопаток турбины вследствие высокотемпературной усталости	132
Виноградов С. Н., Волчихин В. И., Ширина Е. В., Мещеряков А. С. Исследование коррозионной стойкости конструкционных сталей в пластовой воде	139
Шлычков С. В., Иванов С. П., Кузовков С. Г., Лоскутов Ю. В. Расчет геометрически нелинейных конструкций методом конечных элементов	145
Проничев А. А., Пенский О. Г. Моделирование многоствольных строительных импульсно-тепловых машин	153
Аннотации	162
Сведения об авторах	167

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.324

С. А. Зинкин

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КОНЦЕПТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ И СЕТЕЙ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Предлагаются модели и методы, которые могут быть использованы в качестве основы создания новой объектно-ориентированной сетевой технологии моделирования и проектирования распределенных систем хранения и обработки данных на основе согласованных взаимодействий объектов через общее пространство – коммуникационную среду или общее пространство информационных объектов.

Введение

Сетевые представления дискретных динамических систем могут быть положены в основу ряда технологий системного моделирования и распределенного сетевого программирования. Сетевые формализмы также соответствуют парадигме согласования объектов и процессов [1].

В работах [2, 3] были определены сети абстрактных машин (CeAM) нескольких видов, которые могут быть положены в основу построения новых инструментальных средств для распределенного моделирования и программирования, базирующихся на концепции непосредственно интерпретируемых спецификаций. Последнее означает, что описания моделей «непосредственно» программируются в терминах выражений и операторов некоторого языка или реализуются комплексом специализированных программно-аппаратных средств. При реализации сетевой технологии, базирующейся на формализме CeAM, требуется размещение в операционной среде вычислительной сети данных, структурированных как объекты некоторого FS -пространства (от function spaces).

Концептуально формализм CeAM берет свое начало от эволюционирующих алгебраических систем [4] и машин Колмогорова [5]. Для построения сетей абстрактных машин в работах [2, 3] была предложена алгебра CeAM. Использование основных идей из алгебры алгоритмов Глушкова [6], например суперпозиций темпоральных и дополнительных операторов, позволяет естественным образом проектировать сложные иерархические расширенные сети абстрактных машин (ИРСеАМ). В этой связи выделяются два класса сетей абстрактных машин. В относительно простых сетях первого класса подсети, или модули РСeАМ, начиная с тривиальных подсетей – элементарных обновлений интерпретации текущей сигнатуры, составляющих систему образующих, участвуют в операциях однократно. В сложных сетях

второго класса допускается многократное участие указанных подсетей – модулей РСeAM в произвольных суперпозициях подсетей. В обоих случаях формируются иерархические сети.

В дальнейшем общая аббревиатура СеАМ используется для обозначения технологии или реализации сетей, если это не противоречит контексту; там же, где следует различать конкретные виды выражений, описывающих сети абстрактных машин, используются аббревиатуры СеАМ, РСeAM и ИРСeAM.

В приложениях информатики обычно рассматривают некоторое множество Σ представлений с интерпретацией I в множестве S элементов; интерпретация I данному представлению σ ставит в соответствие некоторое абстрактное информационное содержание $I(\sigma)$, т.е. интерпретации соответствует отображение $I: \Sigma \rightarrow S$ [7]. Пусть Σ – множество функциональных и предикатных символов различных арностей (в многосортных, или многоосновных, системах тип n -арного предикатного символа – это кортеж $(i_1, i_2, \dots, i_n, j)$, а тип n -арного предикатного символа – это кортеж $(i_1, i_2, \dots, i_n)$, где $i_1, i_2, \dots, i_n, j$ – названия (сорта) для основ, или носителей), S – множество конкретных функций и предикатов. Сеть абстрактных машин СеАМ использует построенные с использованием определенной в работах [2, 3] алгебры модулей абстрактных машин «модули-продукции» и «модули-процедуры», которые модифицируют, или «обновляют», интерпретацию I , выполняя сгруппированные в блоки так называемые правила обновления вида $I(\sigma_i) \leftarrow S_j$. В работах [4, 5] предложено использовать в машинах абстрактных состояний специальные операции – элементарные обновления функций и предикатов. Элементарное правило обновления функции или предиката запишем в виде правила вывода:

$$\frac{t_1, t_2, \dots, t_k, t_{k+1}}{s(t_1, t_2, \dots, t_k) \leftarrow t_{k+1}},$$

где $t_1, t_2, \dots, t_k$ – термы различных сортов; s – функциональный или предикатный символ. В случае, если s – функциональный символ, то t_{k+1} – суть терм любого сорта, а если s – предикатный символ, то t_{k+1} – булево выражение.

Сеть СеАМ функционирует, переходя от одной интерпретации $I(t_i)$ к другой $I(t_k)$, где t_i и t_k – последовательные моменты времени. В алгебре абстрактных машин мы включаем подобные правила обновления в систему образующих.

Представления процедурных и декларативных знаний о предметной области в сценарных моделях

В настоящее время активно развиваются методы, основанные на предварительном формальном описании предметной области – ее понятий, отношений, закономерностей. При формализации предметных областей, связанных с системами и сетями хранения и обработки данных, широко используются сетевые модели. В сетевых моделях представляются как информационно-структурные знания о предметной области, так и знания о процессах, причинно-следственных связях, законах функционирования, сценариях деятельности. Модели представления знаний условно разделяются на декларативные (непроцедурные) и процедурные.

В работах [8, 9] были рассмотрены сценарные модели, являющиеся разновидностью семантических сетей с событиями и темпоральными связями. Самомодифицируемые сценарные модели, реализуемые сетями абстрактных машин высших порядков, особенно удобны при создании такого сетевого программного обеспечения реконфигурируемых систем хранения и обработки структурированных данных, в котором стираются грани между сетевой операционной системой, распределенной системой управления базой данных и распределенным приложением.

Используемые для представления сценариев сети абстрактных машин допускают недвусмысленное описание операционной и функциональной семантик. Кроме того, выражения для модулей, или узлов, СеАМ представляют собой логические формулы, которые аксиоматизируют определенные свойства сети в целом.

Современный подход к переводу модели на язык, приемлемый для используемой ЭВМ, рекомендует поддержку парадигм декларативного и функционального программирования, а также соблюдения основных принципов структурированного, событийно-управляемого и объектно-ориентированного программирования. Технология имитационного моделирования в целом должна поддерживать системную интеграцию и концептуальное проектирование. Концептуальное проектирование обычно выполняется в процессе предпроектных исследований, формулировки технического предложения, разработки эскизного проекта; при концептуальном проектировании применяют ряд спецификаций, среди которых центральное место занимают модели преобразования, хранения и передачи информации [10]. В данной работе рассмотрены четыре класса моделей систем: функциональные модели, описывающие совокупность выполняемых системой функций; информационные модели, отражающие структуры данных, их состав и взаимосвязи; поведенческие модели, описывающие динамику функционирования информационных процессов и оперирующие с такими категориями, как состояния системы, события, переходы из одних состояний в другие, условия перехода, последовательности событий; структурные модели, характеризующие морфологию системы, или ее построение – состав подсистем и их взаимосвязи.

В настоящей работе делается попытка интеграции основных концепций методик, основанных на перечисленных выше четырех классах моделей систем. Выбран формализм сетей абстрактных машин, интерпретация $I(t)$ сигнатуры Σ которых обновляется («эволюционирует» во времени). Помимо обычных отношений, представленных областями истинности соответствующих предикатов, здесь используются темпоральные отношения. Темпоральные отношения и связанные с ними операции могут быть реализованы как следствия причинных воздействий одних активных объектов на другие. Сценарии эволюций интерпретации сигнатуры алгебраической системы задаются согласованной работой сети алгоритмических модулей, или модулей абстрактных машин. Использование логик высших порядков и иерархической организации сетей абстрактных машин расширяет функциональные возможности формализма, который предлагается применять на различных этапах иерархического проектирования и моделирования – от концептуального до разработки исполняемых спецификаций реальной системы.

Структурирование и модификация сценариев

Работа сценария определена над некоторым структурированным FS -пространством функций и предикатов. Введем следующие правила вывода для модификации ролевых и объектных предикатов и функций:

$$\frac{t_1, b}{p^{(1)}(t_1) \leftarrow b}, \frac{t_1, t_2, b}{p^{(2)}(t_1, t_2) \leftarrow b}, \frac{t_1, s}{f^{(1)}(t_1) \leftarrow s},$$

где $p^{(1)}$, $p^{(2)}$ – унарный и бинарный предикатные символы; $f^{(1)}$ – унарный функциональный символ; t_1, t_2, s – произвольные термы, возможно, различных сортов; b – булев терм.

Модифицируя предикаты и функции, можно по мере необходимости конкретизировать или изменять отношения между объектами, изменяя их роли и свойства.

Представляет интерес также непосредственное использование одной из основных концепций СеАМ – системы образующих в алгебре модулей, или множества элементарных обновлений функций и предикатов для образования и устранения связей в семантических сетях и сценариях. Например, установлению темпоральной связи « $\uparrow$ » (свидетельствующей о непосредственном следовании подсценариев друг за другом) между подсценариями A_1 и A_2 соответствует элементарное правило обновления бинарного предиката:

$$\uparrow(A_1, A_2) \leftarrow \text{true},$$

а разрыву этой связи соответствует правило обновления:

$$\uparrow(A_1, A_2) \leftarrow \text{false}.$$

Подобные правила определены и над остальными бинарными темпоральными предикатами, каждому из которых соответствует одноименная бинарная темпоральная операция.

Правилу обновления тернарного предиката

$$\text{Op}_\vee(\alpha, A_1, A_2) \leftarrow \text{true}$$

соответствует включение в сценарное выражение α -дизъюнкции в традиционной форме $[\alpha](A_1 \vee A_2)$, а для исключения α -дизъюнкции необходимо выполнить правило обновления

$$\text{Op}_\vee(\alpha, A_1, A_2) \leftarrow \text{false},$$

где $\text{Op}_\vee$ – тернарный предикатный символ, соответствующий префиксной форме записи одноименной операции α -дизъюнкции.

Далее включению подсценария A в цикл и исключению его из цикла соответствуют следующие правила обновления бинарного предиката:

$$\text{Op}_\exists(\alpha, A) \leftarrow \text{true} \text{ и } \text{Op}_\exists(\alpha, A) \leftarrow \text{false}.$$

Аналогично, здесь $\text{Op}_\exists$ – бинарный предикатный символ, соответствующий префиксной форме записи одноименной операции α -итерации. В сценарные выражения данная операция включается в традиционной форме – $[\alpha]\{A\}$.

Используя подобный подход, можно конструировать произвольные сценарии и определять над ними произвольные процедуры модификации. Формализуя данные понятия, определим над иерархическим сценарием A гипотетическую или виртуальную «суперсеть» абстрактных машин SN (рис. 1).

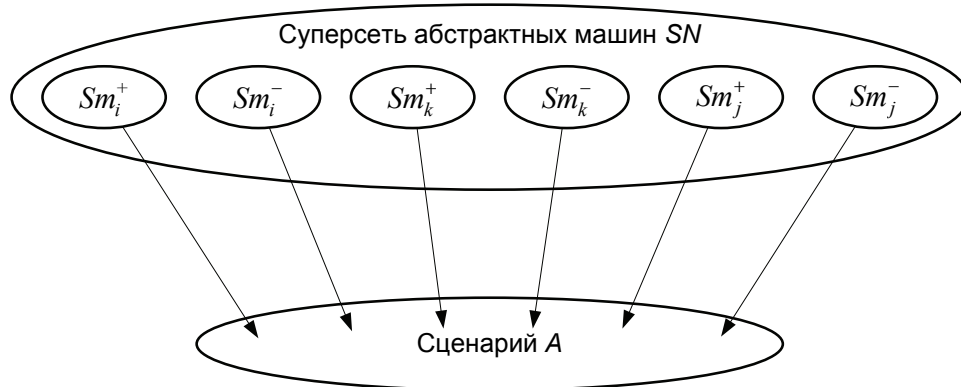


Рис. 1 Формирование и модификация сценария A суперсетью абстрактных машин SN

Данная суперсеть включает в свой состав модули, выполняющие некоторые модификации сценария A :

$$Sm_i^+ = [x_i](Op_{\vee}(\alpha, A_1, A_2) \leftarrow true \vee A^E);$$

$$Sm_i^- = [z_i](Op_{\vee}(\alpha, A_1, A_2) \leftarrow false \vee A^E);$$

$$Sm_k^+ = [x_k](Op_{\exists}(\alpha, A) \leftarrow true \vee A^E);$$

$$Sm_k^- = [z_k](Op_{\exists}(\alpha, A) \leftarrow false \vee A^E);$$

$$Sm_j^+ = [y_j](\uparrow(A_1, A_2) \leftarrow true \vee A^E);$$

$$Sm_j^- = [y_j](\uparrow(A_1, A_2) \leftarrow true \vee A^E),$$

где A^E – тождественный сценарий, не выполняющий никаких действий (аналогичный тождественному оператору E в алгебре алгоритмов Глушкова), а в квадратных скобках записаны выражения для условий готовности выбранного фрагмента сценария к обновлению.

Представление сценариев совокупностями предикатов и функций

Развивая объектно-ориентированный подход, представим сценарии совокупностью предикатов (или отношений) и функций (или операций). В используемых нами представлениях сценариев объединяются три основные концепции представления и обработки знаний – логическая, структурная и процедурная. Логическая концепция используется при формировании булевых выражений для α -условий в операциях α -дизъюнкции и α -итерации. Структурной концепции соответствует формирование объектных отношений, характерных для любой семантической сети. Процедурная составляющая в нашем случае базируется на бинарных темпоральных отношениях, включаемых нами в состав фундаментальных отношений сценарной сети наравне с объектными. Кроме бинарных темпоральных отношений вида p_{τ} и операций вида f_{τ} , процедурная составляющая включает операции α -дизъюнкции и α -итерации для всюду определенных α -условий, представимые двухсортными тернарным и бинарным ($p_{\vee}$ и $p_{\exists}$) предикатами и операциями ($f_{\vee}$ и $f_{\exists}$) соответственно (имеются в виду сорта условий и сценариев). Предикаты вида p_{τ} , $p_{\vee}$ и

$p_{\uparrow}$ задают структуру сценария на всех этапах его построения, а функциями вида f_{τ} , $f_{\vee}$ и $f_{\parallel}$ задается собственно операционная семантика сценария. Таким образом, сигнатура, определенная для предметной области, расширяется множеством выражений следующего вида:

$$\begin{aligned} p_{\tau}: S \times S &\rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}; \\ f_{\tau}: S \times S &\rightarrow S; \\ p_{\vee}: L \times S \times S &\rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}; \\ f_{\vee}: L \times S \times S &\rightarrow S; \\ p_{\parallel}: L \times S &\rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}, \\ f_{\parallel}: L \times S &\rightarrow S, \end{aligned}$$

где S – множество подсценариев; L – множество логических условий; τ – символ темпоральной операции или отношения.

Представим конкретизации операций и отношений для некоторых наиболее характерных фрагментов какого-либо подсценария. Например, выражение для подсценария L_0 некоторого сценария S_0 запишем в виде

$$L_0 = [\beta_2](S_8 \vee L_1) \uparrow S_{12},$$

где $L_1 = (((S_5 \uparrow S_7) \uparrow S_{10}) \uparrow S_{11}) \uparrow (((S_5 \uparrow S_6) \uparrow S_9) \uparrow S_{11}) \uparrow (S_7 \parallel S_9)$.

Здесь для объединения причинно-зависимых подсценариев явно использована операция « $\uparrow$ » конкурентного выполнения. Результатом ее выполнения является теоретико-множественное объединение подграфов, представленных соответствующими подсценариями. Операция « $\parallel$ » используется для синхронизации подсценариев; при этом требуется обязательное пересечение интервалов их реализации. Этапы формирования подсценария L_0 с использованием темпоральных операторов и оператора α -дизъюнкции представлены в табл. 1.

Таблица 1

n	Суперпозиции операторов алгебры сценариев	Конкретизации предикатов
1	$f_{\uparrow}(S_5, S_7)$	$p_{\uparrow}(S_5, S_7) \leftarrow \text{true}$
2	$f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10})$	$p_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}) \leftarrow \text{true}$
3	$f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11})$	$p_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}) \leftarrow \text{true}$
4	$f_{\uparrow}(S_5, S_6)$	$p_{\uparrow}(S_5, S_6) \leftarrow \text{true}$
5	$f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9)$	$p_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9) \leftarrow \text{true}$
6	$f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})$	$p_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11}) \leftarrow \text{true}$
7	$f_{\parallel}(S_7, S_9)$	$p_{\parallel}(S_7, S_9) \leftarrow \text{true}$
8	$f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11}))$	$p_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})) \leftarrow \text{true}$
9	$f_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9)) = L_1$	$p_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9)) \leftarrow \text{true}$
10	$f_{\vee}(\beta_2, S_8, f_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9)))$	$p_{\vee}(\beta_2, S_8, f_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9))) \leftarrow \text{true}$
11	$f_{\uparrow}(f_{\vee}(\beta_2, S_8, f_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9))), S_{12}) = L_0$	$p_{\uparrow}(f_{\vee}(\beta_2, S_8, f_{\parallel}(f_{\parallel}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_7), S_{10}), S_{11}), f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(f_{\uparrow}(S_5, S_6), S_9), S_{11})), f_{\parallel}(S_7, S_9))), S_{12}) \leftarrow \text{true}$

Вводя дополнительные обозначения для формируемых операторов, упростим выражения в табл. 1 и представим их в табл. 2.

Таблица 2

n	Суперпозиции операторов алгебры сценариев	Конкретизации предикатов
1	$f_1(S_5, S_7) = R_1$	$p_1(S_5, S_7) \leftarrow \text{true}$
2	$f_1(R_1, S_{10}) = R_2$	$p_1(R_1, S_{10}) \leftarrow \text{true}$
3	$f_1(R_2, S_{11}) = R_3$	$p_1(R_2, S_{11}) \leftarrow \text{true}$
4	$f_1(S_5, S_6) = R_4$	$p_1(S_5, S_6) \leftarrow \text{true}$
5	$f_1(R_4, S_9) = R_5$	$p_1(R_4, S_9) \leftarrow \text{true}$
6	$f_1(R_5, S_{11}) = R_6$	$p_1(R_5, S_{11}) \leftarrow \text{true}$
7	$f_1(S_7, S_9) = R_7$	$p_1(S_7, S_9) \leftarrow \text{true}$
8	$f_c(R_3, R_6) = R_8$	$p_c(R_3, R_6) \leftarrow \text{true}$
9	$f_c(R_8, R_7) = R_9$	$p_c(R_8, R_7) \leftarrow \text{true}$
10	$f_v(\beta_2, S_8, R_9) = R_{10}$	$p_v(\beta_2, S_8, R_9) \leftarrow \text{true}$
11	$f_1(R_{10}, S_{12}) = L_0$	$p_1(R_{10}, S_{12}) \leftarrow \text{true}$

Подсценарий L_0 сформирован и готов к реализации при истинности выражения

$$\mu_{L_0} = p_1(S_5, S_7) \& p_1(R_1, S_{10}) \& p_1(R_2, S_{11}) \& p_1(S_5, S_6) \& p_1(R_4, S_9) \& p_1(R_5, S_{11}) \& \\ \& p_1(S_7, S_9) \& p_c(R_3, R_6) \& p_c(R_8, R_7) \& p_v(\beta_2, S_8, R_9) \& p_1(R_{10}, S_{12}).$$

Этапы формирования подсценария $L_2 = S_{17} | [\alpha_1] \{ (S_{14} \uparrow S_{15}) \uparrow S_{16} \}$ некоторого сценария S_0 с операцией α -итерации проиллюстрированы в табл. 3.

Таблица 3

n	Суперпозиции операторов алгебры сценариев	Конкретизации предикатов
1	$f_1(S_{14}, S_{15})$	$p_1(S_{14}, S_{15}) \leftarrow \text{true}$
2	$f_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16})$	$p_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16}) \leftarrow \text{true}$
3	$f_{11}(\alpha_1, f_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16}))$	$p_{11}(\alpha_1, f_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16})) \leftarrow \text{true}$
4	$f(S_{17}, f_{11}(\alpha_1, f_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16}))) = L_2$	$p(S_{17}, f_{11}(\alpha_1, f_1(f_1(S_{14}, S_{15}), S_{16}))) \leftarrow \text{true}$

Аналогично предыдущему примеру введем дополнительные обозначения для формируемых операторов, упростим выражения в табл. 3 и представим их в табл. 4.

Таблица 4

n	Суперпозиции операторов алгебры сценариев	Конкретизации предикатов
1	$f_1(S_{14}, S_{15}) = Q_1$	$p_1(S_{14}, S_{15}) \leftarrow \text{true}$
2	$f_1(Q_1, S_{16}) = Q_2$	$p_1(Q_1, S_{16}) \leftarrow \text{true}$
3	$f_{11}(\alpha_1, Q_2) = Q_3$	$p_{11}(\alpha_1, Q_2) \leftarrow \text{true}$
4	$f(S_{17}, Q_3) = Q_4 = L_2$	$p(S_{17}, Q_3) \leftarrow \text{true}$

Подсценарий L_2 сформирован и готов к реализации при истинности выражения

$$\mu_{L_2} = p_1(S_{14}, S_{15}) \& p_1(Q_1, S_{16}) \& p_{11}(\alpha_1, Q_2) \& p(S_{17}, Q_3).$$

Иерархическое объектно-ориентированное проектирование и сети абстрактных машин первого и высших порядков

Распространяя основные идеи, связанные с использованием механизмов наследования и логического вывода на семантических сетях [11–13], на сценарные модели, включим в состав фундаментальных отношений темпоральные отношения наряду с отношениями вида «класс–подкласс», «класс–суперкласс», «является частью», «подмножество–множество» и др. Известно [11], что возможность «сжатия» базы данных, созданной для представления и хранения семантической сети, обеспечивается, например, транзитивностью родовидового отношения «a_kind_of» (или АКО) и отношения принадлежности части объекта к целому «a_part_of» (или АРО), а операции модификации базы знаний на семантических сетях сводятся к удалению и добавлению новых вершин и ребер. Другим мощным средством манипулирования знаниями являются операции «сопоставления с образцом» [11, 13, 14], когда поиск ответа на запрос реализуется путем сопоставления сети запроса с фрагментами семантической сети. Операции сопоставления с образцом при учете не представленных в сценарных моделях фундаментальных отношений могут быть описаны выражениями СеАМ и РСеАМ для сетей абстрактных машин с использованием логики высших порядков или реализованы путем использования обычных механизмов наследования и логического вывода.

В рамках предлагаемых подходов мы рассматриваем иерархию концептуальных моделей различной степени сложности – от концептуальных моделей, «существующих» в уме специалиста, до сложных имитационных моделей, которые воспроизводят поведение системы в деталях. Построение имитационных моделей на основе сетей абстрактных машин позволяет в широкой степени использовать правила модульного иерархического проектирования; межмодульные связи по управлению и по данным унифицируются и четко формализуются, что позволяет использовать иерархическую имитационную модель непосредственно в реализации проекта, например, в виде сложного комплекса управляющих и функциональных программ в сети хранения и обработки данных. В результате возможно значительное снижение трудоемкости и ускорение процесса проектирования системы в целом, упрощается создание ее компонент. Таким образом, в данной работе предлагается некоторая совокупность конструктивных методов проектирования систем и сетей хранения и обработки данных, рассматриваемых как сложные системы. При анализе и построении сложных систем особенно плодотворными оказались методы объектно-ориентированного проектирования (ООП). Данные методы послужили основой для интеграции различных методов представления знаний. Рассмотрим с позиций объектно-ориентированного подхода некоторые особенности используемых или предлагаемых нами имитационных, сценарных и логико-алгебраических моделей.

Объектно-ориентированный подход к проектированию систем и сетей хранения и обработки данных позволяет реализовать как процедурные методы представления знаний, так и методы, основанные на семантических и сценарных сетях. Кроме того, при использовании объектно-ориентированного подхода можно реализовать и логические методы представления знаний. Формулы, как составные, так и атомарные, могут при этом рассматриваться в

качестве объектов. Некоторые известные недостатки логических методов представления знаний можно преодолеть путем структурирования наборов формул. В качестве другого подхода к преодолению данных недостатков нами предлагается использование логики высших порядков.

В системах искусственного интеллекта традиционно используются декларативные и процедурные методы представления знаний. Как в декларативных, так и в процедурных методах знания представляются структурированными данными. В дальнейшем мы будем уделять большее внимание элементам декларативного подхода к представлению процедурных знаний. Процедурные знания мы будем представлять сценарными сетями, или просто сценариями, включающими события и темпоральные отношения между ними. Темпоральные отношения представляются структурированными данными, которыми можно манипулировать в широких пределах. События, или факты, мы будем описывать формулами в логике первого и высших порядков. При этом операции логического вывода, являющиеся основными примитивами для манипуляции знаниями, одинаково применимы как к декларативным, так и к процедурным знаниям, представленным структурированной совокупностью формул.

При объектно-ориентированном подходе предметная область, или проблемная среда, рассматривается как совокупность объектов и связей между ними. В объектно-ориентированных представлениях подграфы сценарной сети могут представлять сложные факты или события, связанные с поведением объектов в проблемной среде. Роли элементарных фактов при этом играют факты наличия или отсутствия связей определенного типа между объектами. Как разновидность понятия «семантическая сеть», представление которой в базе данных описано в работе [15], в общем случае сценарную сеть мы также представим совокупностью кортежей произвольных отношений (или областями истинности произвольных предикатов). Отношения задаются на множествах (доменах) значений свойств объектов. Каждая такая совокупность, или ассоциативный кортеж, представляет набор характеристик некоторого базового объекта, информационная модель которого задается так называемым комплексом данных [15].

Рассмотрим способы хранения объектов в информационном пространстве (в FS -пространстве функций и предикатов), позволяющие сохранить семантическую информацию. Одной из важнейших задач в объектно-ориентированной системе является обеспечение перманентности, или постоянства хранения объектов.

Обычно в реляционной СУБД для представления иерархии классов необходимо решать следующие задачи [16]:

- создать отношения, соответствующие рассматриваемой иерархии классов;
- предусмотреть возможность преобразования объектов в строки и сохранения этих объектов в отношениях;
- предусмотреть возможность чтения строк из отношений и реконфигурирования объектов.

При решении данной задачи обеспечивается преобразование экземпляров класса, т.е. объектов, в кортежи. В работе [16] был исследован ряд способов преобразования классов в отношения: преобразование каждого класса или подкласса в отношение, преобразование каждого подкласса в отношение

и преобразование иерархии в одно отношение. Отмечено, что для данных способов характерна потеря семантической информации. Предложим новый подход к сохранению семантической информации об объектах, базирующийся на элементах логики предикатов второго порядка и на правилах вывода при хранении и извлечении объектов из информационного *FS*-пространства. Как обычно в многосортном исчислении предикатов, рассмотрим множество выражений вида

$$p: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\},$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ – сорта, интерпретируемые как множества; p – n -арный предикатный символ.

Предикаты задают структурные связи между понятиями предметной области, например, между объектами или событиями. Рассмотрим далее предикаты $P_{\text{ISA}}(z_1, z_2)$ и $P_{\text{AKO}}(z_3, z_4)$, где $z_1 \in X$ – предметная переменная, пробегающая по всем элементам множества объектов X ; $z_2 \in P$ – предикатная переменная, пробегающая по всем предикатам из множества P всех классов; $z_3 \in P_1$ – предикатная переменная, пробегающая по всем предикатам из множества P_1 , представляющего подклассы, а $z_4 \in P_2$ – предикатная переменная, пробегающая по всем предикатам из множества P_2 , представляющего суперклассы. Множества предикатов P_1 и P_2 , возможно, пересекающиеся, т.к. в общем случае некоторые из рассматриваемых классов могут принадлежать как подклассам, так и суперклассам. Здесь P_{ISA} – бинарный предикат, устанавливающий принадлежность объекта классу, а P_{AKO} – бинарный предикат, устанавливающий соответствие «подкласс–суперкласс».

В отличие от работы [16], мы будем представлять классы областями истинности соответствующих предикатов. Рассмотрим пример иерархии наследования для некоторого класса A и его подклассов B, C и D , заданных предикатами $P_A(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$, $P_B(x_1, x_6, x_7)$, $P_C(x_1, x_8, x_9)$, $P_D(x_1, x_{10})$. Здесь используются 10 предметных переменных различных сортов (типов). Переменная x_1 выполняет роль первичного ключа. Областями истинности данных предикатов представлены четыре отношения, хранимые в реляционной базе данных. Для сохранения семантической информации (в данном случае информации об иерархии наследования), добавим к данным предикатам логическое выражение

$$P_{\text{AKO}}(P_B, P_A) \& P_{\text{AKO}}(P_C, P_A) \& P_{\text{AKO}}(P_D, P_A).$$

Истинность данного выражения свидетельствует о задании отношения наследования.

Далее добавим к предикатам и логическому выражению три правила вывода для представления каждого класса одним предикатом:

$$\begin{aligned} & (\forall x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) [P_B(x_1, x_6, x_7) \& P_{\text{AKO}}(P_B, P_A) \supset \\ & \supset P'_B(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)]; \\ & (\forall x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_8, x_9) [P_C(x_1, x_8, x_9) \& P_{\text{AKO}}(P_C, P_A) \supset \\ & \supset P'_C(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_8, x_9)]; \\ & (\forall x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{10}) [P_D(x_1, x_{10}) \& P_{\text{AKO}}(P_D, P_A) \supset \\ & \supset P'_D(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{10})]. \end{aligned}$$

Здесь запись $(\forall x_1, x_2, \dots, x_n)$ эквивалентна записи $(\forall x_1)(\forall x_2, \dots, (\forall x_n))$. Таким образом, для хранения объектов и информации о наследовании

свойств объектов без потери семантической информации, как проиллюстрировано на примере, достаточно сформировать базу знаний, включающую экстенционал – области истинности предикатов и интенционал – правила вывода. Приведенные выше правила реализуются модулями СеАМ второго порядка, описываемыми следующими выражениями:

$$\begin{aligned} m_B &= [\tilde{\forall} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)(P_B(x_1, x_6, x_7) \& P_{AKO}(P_B, P_A))] \\ (P'_B(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7) &\leftarrow \text{true} \vee R^E); \\ m_C &= [\tilde{\forall} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_8, x_9)(P_C(x_1, x_8, x_9) \& P_{AKO}(P_C, P_A))] \\ (P'_C(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_8, x_9) &\leftarrow \text{true} \vee R^E); \\ m_D &= [\tilde{\forall} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{10})(P_D(x_1, x_{10}) \& P_{AKO}(P_D, P_A))] \\ (P'_D(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_{10}) &\leftarrow \text{true} \vee R^E). \end{aligned}$$

В общем случае иерархию наследования можно доопределить, используя обычные для семантических сетей правила вывода:

$$(\forall x \in X)(\forall y \in P_1)(\forall z \in P_2)[P_{ISA}(x, y) \& P_{AKO}(y, z) \supset P_{ISA}(x, z)];$$

$$(\forall u \in P)(\forall v \in P)(\forall w \in P)[P_{AKO}(u, v) \& P_{AKO}(v, w) \supset P_{AKO}(u, w)].$$

Здесь все переменные, кроме x , предикатные и пробегает по множествам предикатов, представляющих классы. Предметная переменная x пробегает по элементам множества всех экземпляров классов (объектов). Ряд правил мы использовали ранее для выявления некоторых отношений в сценарных моделях. Последние два правила реализуются следующими модулями СеАМ второго порядка:

$$\begin{aligned} m_{ISA} &= [\tilde{\forall} (x \in X, y \in P_1, z \in P_2)(P_{ISA}(x, y) \& P_{AKO}(y, z))] \\ (P_{ISA}(x, z) &\leftarrow \text{true} \vee R^E); \\ m_{AKO} &= [\tilde{\forall} (u \in P, v \in P, w \in P)(P_{AKO}(u, v) \& P_{AKO}(v, w))] \\ (P_{AKO}(u, w) &\leftarrow \text{true} \vee R^E). \end{aligned}$$

В общем случае развитая система объектно-ориентированного проектирования должна поддерживать модификацию определений классов, структуры наследования, спецификации атрибутов и методов. Типичные изменения, которые могут потребоваться, сводятся к следующим [16]:

- изменение определения класса;
- изменение атрибутов;
- изменение методов;
- изменение иерархии наследования;
- определение суперкласса для некоторого класса;
- удаление суперкласса для некоторого класса;
- создание и удаление классов, изменение имен классов.

В рамках предлагаемых нами методов (например, конкретизация иерархии наследования, т.е. конкретизация предиката второго порядка P_{AKO} для рассмотренного ранее примера) осуществляется путем выполнения правил обновления:

$$P_{AKO}(P_B, P_A) \leftarrow \text{true}, P_{AKO}(P_C, P_A) \leftarrow \text{true}, P_{AKO}(P_D, P_A) \leftarrow \text{true},$$

а исключение какого-либо подкласса из иерархии, например подкласса C , осуществляется путем применения правила $P_{AKO}(P_C, P_A) \leftarrow \text{false}$.

Рассмотрим представление сложных структурированных событий в сценариях на примере следующей интерпретации предметной области, опи-

санной ранее предикатами P_A, P_B, P_C и P_D . Пусть $x_1 \in X_1$ – предметная переменная, пробегающая по объектам сорта «событие», а остальные переменные $x_2, x_3, \dots, x_{10}$ пробегают по соответствующим множествам $X_2, X_3, \dots, X_{10}$ объектов, участвующих в реализации событий класса A и подклассов B, C и D . Введем далее бинарные предикаты $R_{1,2}, R_{1,3}, \dots, R_{1,10}$, характеризующие роль объектов сорта X_i ($i = 2, 3, \dots, 10$) в событиях сорта X_1 . Тогда наряду с предикатами P_A, P_B, P_C и P_D определенность всех ролей некоторых выбранных объектов $x'_i \in X_i$ ($i = 2, 3, \dots, 10$) при реализации ими соответствующего сложного события x'_1 можно охарактеризовать выражениями

$$\begin{aligned} &R_{1,2}(x'_1, x'_2) \& R_{1,3}(x'_1, x'_3) \& R_{1,4}(x'_1, x'_4) \& R_{1,5}(x'_1, x'_5); \\ &R_{1,6}(x'_1, x'_6) \& R_{1,7}(x'_1, x'_7); \\ &R_{1,8}(x'_1, x'_8) \& R_{1,9}(x'_1, x'_9); \\ &R_{1,10}(x'_1, x'_{10}), \end{aligned}$$

или выражениями с предикатными символами второго порядка

$$\begin{aligned} &R_A(R_{1,2}(x'_1, x'_2), R_{1,3}(x'_1, x'_3), R_{1,4}(x'_1, x'_4), R_{1,5}(x'_1, x'_5)); \\ &R_B(R_{1,6}(x'_1, x'_6), R_{1,7}(x'_1, x'_7)); \\ &R_C(R_{1,8}(x'_1, x'_8), R_{1,9}(x'_1, x'_9)); \\ &R_D(R_{1,10}(x'_1, x'_{10})). \end{aligned}$$

Для сохранения семантической информации о наследовании свойств в иерархии событий введем конъюнкцию:

$$P'_{AKO}(R_B, R_A) \& P'_{AKO}(R_C, R_A) \& P'_{AKO}(R_D, R_A),$$

где P'_{AKO} – предикатный символ третьего порядка.

Для конкретизации предикатов предлагается использовать модули СеАМ первого, второго и третьего порядков, в которых обновляются предикаты соответствующего порядка.

Заключение

На основе введенного определения самомодифицируемого сценария как активной семантической сети, представленной суперпозициями концептуальных графов, предложен алгебраический подход к конструированию сложных иерархических эволюционирующих сценарных сетей, облегчающий создание новых технологий проектирования систем хранения и обработки данных. Принятая парадигма взаимодействия процессов отличается согласованным использованием информационных объектов, представленных сигнатурой многоосновной алгебраической системы, причем структурные и логические связи между понятиями предметной области представляются сигнатурой и формулами в этой сигнатуре. Сигнатура представляет декларативные знания, сценарии – процедурные знания о предметной области. Предложена реализация сценариев сетями абстрактных машин, состоящих из модулей, объединенных причинно-следственными связями, что позволяет эффективно оперировать с моделями вертикально и горизонтально структурированных распределенных систем. Использование логики предикатов первого и высших порядков в существенной степени повышает операционные возможности сценарных моделей, позволяя реализовывать сложные запросы к сети сценариев. В данном представлении сценарии также являются объектами, представляемыми совокупностями кортежей, или ассоциативны-

ми кортежами, хранимыми в основном *FS*-пространстве или в управляющем *CFS*-пространстве (Control Function Space). Подобное представление сценариев допускает их простую и эффективную аппаратную или программную реализацию в процессорах баз данных и на базе модулей ассоциативной памяти.

Список литературы

1. **Таненбаум, Э.** Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стен. – СПб. : Питер, 2003. – 878 с.
2. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и его расширения) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 3. – С. 13–22.
3. **Зинкин, С. А.** Сети абстрактных машин высших порядков в проектировании систем и сетей хранения и обработки данных (механизмы интерпретации и варианты использования) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 37–50.
4. **Gurevich, Y.** Evolving Algebras 1993: Lipari Guide / Y. Gurevich // Specification and Validation Methods / ed. E. Börger. – Oxford University Press, 1995. – P. 9–36.
5. **Gurevich, Y.** On Kolmogorov machines and related issues. The logic in computers science column / Y. Gurevich // Bulletin of European Assoc. for Theor. Comp. Science. – 1998. – № 35. – P. 71–82.
6. **Глушков, В. М.** Алгебра. Языки. Программирование / В. М. Глушков, Г. Е. Цейтлин, Е. Л. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1978. – 320 с.
7. **Брой, М.** Информатика. Основополагающее введение / М. Брой. – М. : Диалог-МИФИ (Springer-Lehrbuch), 1996. – Ч. I. – 300 с.
8. **Зинкин, С. А.** Самомодифицируемые сценарные модели функционирования систем и сетей хранения и обработки данных (базовый формализм и темпоральные операции) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 3–12.
9. **Зинкин, С. А.** Самомодифицируемые сценарные модели функционирования систем и сетей хранения и обработки данных (реализация и свойства сценарных моделей) / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 13–21.
10. **Норенков, И. П.** Подходы к проектированию автоматизированных систем / И. П. Норенков // Наука в образовании : электронное научное издание. – 2005. – №6. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru:8001/db/msg/26310.html>
11. Перспективы развития вычислительной техники : в 11 кн. / под ред. Ю. М. Смирнова. Кн. 2. Интеллектуализация ЭВМ / Е. С. Кузин, А. И. Ройтман, И. Б. Фоминых, Г. К. Хахалин. – М. : Высшая школа, 1989. – 160 с.
12. Представление и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М. : Мир, 1989. – 220 с.
13. **Поспелов, Г. С.** Искусственный интеллект – основы новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. – М. : Наука, 1988. – 280 с.
14. Робототехника и гибкие автоматизированные производства : в 9 кн. Кн. 6. Техническая имитация интеллекта / В. М. Назаретов, Д. П. Ким ; под ред. И. М. Макарова. – М. : Высшая школа, 1986. – 144 с.
15. **Калиниченко, Л. А.** Методы и средства интеграции неоднородных баз данных / Л. А. Калиниченко. – М. : Наука, 1983. – 424 с.
16. **Конолли, Т.** Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Т. Конолли, К. Бегг. – М. : Вильямс, 2003. – 1440 с.

ГРАФОТРАНСФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ФОРМАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ IEC 61499

Рассмотрен подход на основе преобразований графов для синтеза формальных моделей систем функциональных блоков IEC 61499. В качестве модельной формы предлагаются арифметические NCES-сети. Процесс синтеза представляется как поток моделей. С помощью метамodelей описываются языки представления систем функциональных блоков и модульных арифметических NCES-сетей на основе графов. Рассмотрены правила трансформации графов для некоторых этапов синтеза.

Введение

Основными этапами разработки управляющих систем на основе функциональных блоков (ФБ) нового международного стандарта IEC 61499 [1] являются формулировка требований (предъявляемых к системе), формализованное описание управления и объекта управления (моделирование), верификация, валидация и реализация [2]. Одним из слабо формализованных этапов является разработка формальных моделей контроллеров и объектов управления. Это приводит к ошибкам проектирования, усложняет автоматизацию данного этапа и замедляет процессы разработки и повторного проектирования системы в целом.

Наибольшей популярностью при моделировании систем ФБ IEC 61499 пользуются модульные NCES-сети [3], берущие свое начало от сетей Петри. Одной из первых в этой области была работа [4], в [5] освещаются вопросы моделирования алгоритмов ФБ с помощью NCES на уровне целочисленной арифметики. В последнее время были предприняты новые попытки автоматизации моделирования систем ФБ на основе NCES-сетей. В работе [6] были предложены неформальные правила для создания моделей некоторых элементов ФБ, а также моделей их выполнения. Данные правила были реализованы в системе FBSD, разработанной в среде Eclipse. В работе [7] правила преобразования реализуются в виде XSLT-скриптов и правил языка Пролог. Следует отметить, что работы [6, 7] ограничены в плане моделирования, например, в них не учитывается диаграмма состояний операций ECC (см. Figure 12 в [1]).

Несмотря на значительный прогресс в области моделирования и автоматизации построения формальных моделей ФБ на основе NCES-сетей, можно выделить следующие основные нерешенные проблемы: 1) сложность моделирования потоков данных и алгоритмов; 2) отсутствие формальных правил преобразования систем ФБ в NCES-сети; 3) сложность перепрограммирования систем синтеза при изменении правил. И главное – отсутствует целостная методология синтеза формальных моделей для систем ФБ.

В данной работе для синтеза формальных моделей систем ФБ IEC 61499 предлагается подход на основе *управления моделями*. Отправным пунктом проектирования является начальное описание системы ФБ, а конечным результатом – формальная модель системы. Для уменьшения сложности моделирования алгоритмов и передач данных в системах ФБ в качестве модельной формы предлагаются арифметические NCES-сети. Технология, основанная на управлении моделями (*Model Driven Engineering – MDE*), является в настоящее время передовой технологией разработки программного обеспе-

чения. Трансформация моделей является «душой и сердцем» этой технологии [8]. Важным направлением в области трансформации моделей является *синтез* моделей. Он относится к классу экзогенных вертикальных трансформаций. Для того чтобы трансформировать модели, они должны быть выражены на некотором языке моделирования, синтаксис которого определяется некоторой *метамоделью*. Метамодели выражают как исходную, так и целевую модели трансформации. Существует несколько нотаций (метаметамodelей) для построения метамodelей, среди которых, например, язык *UML*.

Перспективным подходом к трансформации моделей является подход, основанный на трансформации графов [9]. Он развивается и уже нашел применение в *MDE*. Например, был успешно применен для рефакторинга диаграмм *ECC* в базисных ФБ [10]. Преимуществом подхода является его формальность, что позволяет избежать многих ошибок проектирования и проверить правила на корректность. Этот подход был принят в данной работе за основу. В качестве метамodelей используются типизированные атрибутные графы (ТАГ) [9], и трансформация на их основе поддерживается системой *AGG*, которая является одним из наиболее популярных средств для трансформаций графов [11].

1 Поток моделей в процессе синтеза

Представим процесс синтеза *aNCES*-сетей для систем ФБ как поток графовых моделей (рис. 1). В приведенной на рис. 1 диаграмме состояний модели представлены как состояния, а макропреобразования – как переходы. Отправным пунктом преобразований является графовая модель исходной системы ФБ (состояние *s0*). Как правило, эта модель является многоуровневой. Конечным пунктом преобразования является графовая модель одноуровневой («плоской») *aNCES*-сети (состояние *s4*). Эта модель является наиболее приемлемой для дальнейшего анализа. Промежуточное (опциональное) состояние *s1* представляет исходную систему ФБ, в базовых ФБ которой проведен рефакторинг диаграмм управления выполнением (диаграмм *ECC*) [10]. Состояние *s2* определяет одноуровневую («плоскую») систему ФБ, которую можно принять за некоторую нормализованную форму для дальнейшего использования, например, для реализации, имитационного моделирования или анализа. Состояние *s3* представляет многоуровневую *aNCES*-модель, состоящую из множества взаимосвязанных *aNCES*-модулей. Это наиболее компактное и понятное для пользователя представление *aNCES*-моделей. Переход из одного состояния в другое производится в результате применения наборов трансформационных правил *R0*, *R1*, *R2* и *R3*.

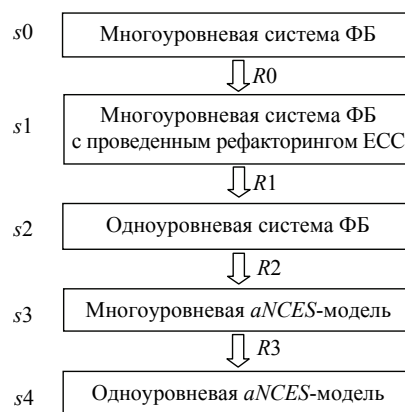


Рис. 1 Поток моделей в задаче синтеза *NCES*-сетей для систем ФБ

2 Арифметические NCES-сети

В зависимости от типа маркировки и весов дуг будем различать арифметические NCES-сети целочисленного и вещественного типов, причем второй тип сети включает первый. Арифметические NCES-сети вещественного типа определяются как $N = (P, T, H, A, B, I, W, S, M, F, Q, C, m_0)$, где P – конечное непустое множество позиций; T – конечное непустое множество переходов; $H \subseteq P \times T \cup T \times P$ – множество обычных дуг; $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ – множество арифметических дуг; $H \cap A = \emptyset$; $B \subseteq P \times T$ – множество условных дуг; $I \subseteq P \times T$ – множество ингибиторных дуг; $W: H \cup B \rightarrow R$ – функция весов обычных и условных дуг, где R – множество действительных чисел; $S \subseteq T \times T$ – множество событийных дуг; $M: T \rightarrow \{\&, \vee\}$ – режим срабатывания перехода; $F = F^{(0)} \cup F^{(1)} \cup F^{(2)} \cup \dots$ – бесконечное множество функций различных арностей. Функция $f \in F^{(n)}$ определяется как $f: R^n \rightarrow R$; $Q: T \rightarrow F \cup \{none\}$ – функция, назначающая переходам функции из F ; $C: A \cap P \times T \rightarrow \{1, 2, \dots\}$ – функция нумерации входных арифметических дуг переходов; $m_0: P \rightarrow R$ – начальная маркировка сети.

Как можно заметить, основное отличие арифметических NCES-сетей вещественного типа от обычных NCES-сетей заключается в том, что расширен домен маркировок и весов дуг до вещественных чисел и переходам могут назначаться функции обработки данных.

Введем следующие множества: $apre^t = \{p \mid (p, t) \in A\}$ – множество входных арифметических позиций перехода $t \in T$; $apost^t = \{p \mid (t, p) \in A\}$ – множество выходных арифметических позиций перехода $t \in T$. Должны выполняться следующие ограничения: 1) $\forall t \in T [apost^t \leq 1]$; 2) $|apre^t|$ должно быть равно арности функции $Q(t)$ (если таковая имеется).

Функция нумерации входных арифметических дуг перехода t определяется как $C^t: apre^t \rightarrow \{1, 2, \dots, |apre^t|\}$. Общая функция нумерации C вычисляется как $C = \bigcup_{t \in T} C^t$. Порядок нумерации входных арифметических дуг дол-

жен соответствовать порядку аргументов функции, поставленной в соответствие переходу.

Семантика вещественных NCES (без функций) сходна с семантикой обычных NCES, несмотря на то, что используется вещественный домен чисел. Семантика арифметических вещественных NCES (с функциями) отличается от семантики обычных NCES в следующем: 1) маркировка позиций из множеств $apre^t$ и $apost^t$ не влияет на разрешенность перехода $t \in T$; 2) при срабатывании перехода $t \in T$, для которого $Q(t) \neq none$, маркировка позиций $apre^t$ не изменяется, а маркировка позиций из $apost^t$ устанавливается равной значению функции $Q(t)$. При вызове функции $Q(t)$ позиции из $apre^t$ упорядочиваются в соответствии с функцией нумерации C^t .

На рис. 2 приведен пример перехода сетевой модели, имеющего обычные (pt и tp), условные (c), событийные (ev), ингибиторные (i) и арифметические (pa и ap) дуги, а также функцию обработки данных (f). Следует отметить, что в рамках аNCES-сетей могут быть разработаны доменно-ориентированные переходы для определенной предметной области. Для моделирования алгоритмов полезны переходы-обработчики, выполняющие элементарные арифметические, логические операции и операции сравнения. Из них могут быть составлены любые алгоритмы обработки данных.

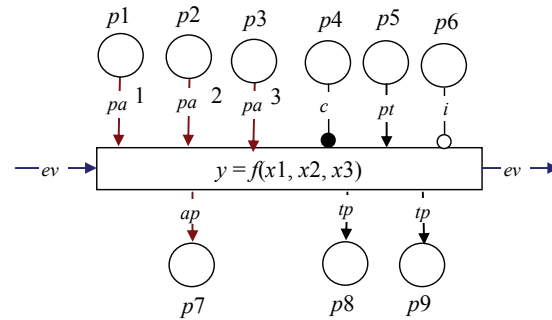


Рис. 2 Переход aNCES-сети

Другое важное расширение *aNCES*-сетей находится в области структуризации сетевых моделей. Известно, что в обычных модульных *NCES*-сетях не разрешены потоки меток между модулями. Это затрудняет моделирование потоков данных между ФБ. Используемый в *aNCES*-сетях модуль представляет собой *макроопределение* (рис. 3). В отличие от *NCES*-модулей, между модулями этого типа возможна передача меток. Тип входа-выхода модуля определяется типом проходящей через границу модуля дуги.

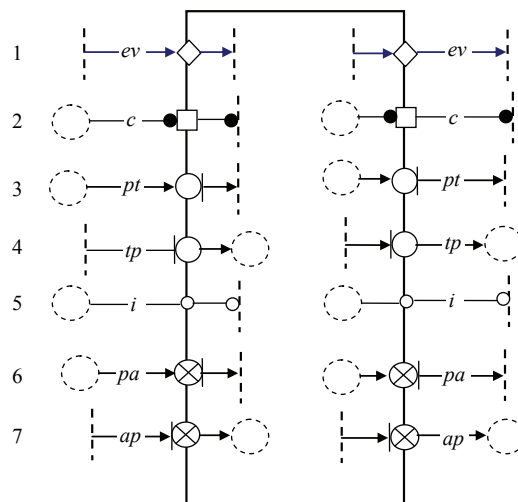


Рис. 3 Схема модуля aNCES

3 Метамоделли систем функциональных блоков

Ниже определяется графический язык функциональных блоков, основанный на их представлении в виде ТАГ. Мотивом разработки языка является создание языковой базы для трансформации описаний систем ФБ в другие модельные формы, в частности в сетевые модели для проведения верификации системы. Синтаксис языка ФБ определяется с помощью метамодели. Подход на основе метамоделирования широко распространен для определения синтаксиса визуальных языков моделирования.

Разработаны метамодели начального языка ФБ, включая метамодели базисного и составного ФБ, а также метамодели одноуровневых систем, используемые в процессе синтеза формальных моделей. В качестве примера рассмотрим лишь метамодель одноуровневой системы ФБ (соответствующей

состоянию s_2 на рис. 1). В одноуровневой системе ФБ раскрыты все блоки, включая базисные. Эти системы состоят только из «начинок» базисных ФБ, связанных сетью клапанов данных (КД). При этом интерфейсные элементы базисных ФБ сохраняются. Эту форму представления систем ФБ можно считать нормализованной, поскольку ее дальнейшее раскрытие невозможно.

Идея КД и переход к одноуровневой структуре систем ФБ были впервые предложены в работе [12]. КД представляет программную единицу, осуществляющую при приходе управляющего сигнала копирование данных с информационных входов на выходы. В простейшем случае КД представляет копировщик, управляемый от разветвителя сигнала (рис. 4). Каждый КД имеет один событийный вход-выход и несколько информационных входов-выходов. Для представления КД могут использоваться различные нотации (рис. 5). На рис. 6 представлена метамодель замкнутой одноуровневой системы ФБ.

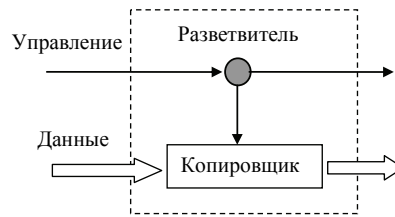


Рис. 4 Простой клапан данных

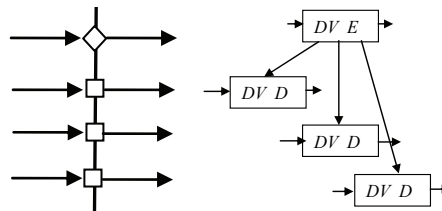


Рис. 5 Представления клапана данных

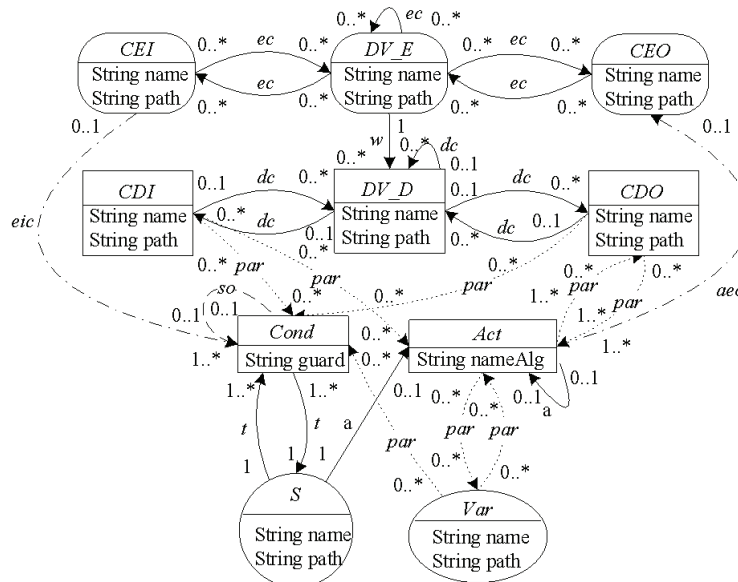


Рис. 6 Метамодель одноуровневой системы ФБ

В приведенной метамодели (рис. 6) используются следующие типы вершин: *CEI* и *CEO* – событийные вход и выход оболочки ФБ соответственно; *CDI* и *CDO* – информационные вход и выход оболочки ФБ соответственно; *S* – *EC*-состояние; *Cond* – условие *EC*-перехода; *Act* – *EC*-акция; *Var* – внутренняя переменная; *DV_E* – разветвитель КД; *DV_D* – копировщик КД.

В метамодели на рис. 6 используются следующие типы дуг: *w* – *WITH*-связь; *eic* – дуга, связывающая событийный вход оболочки с условием *EC*-перехода; *aeo* – дуга, связывающая *EC*-акцию с событийным выходом оболочки; *t* – дуга, связывающая *EC*-состояния и условия; *a* – дуга, связывающая *EC*-состояние с первой *EC*-акцией или *EC*-акции между собой согласно порядку их выполнения; *so* – дуга, определяющая порядок оценки *EC*-переходов, выходящих из одного *EC*-состояния; *par* – дуга для представления потоков данных через алгоритмы. Данная дуга служит также для определения параметров условия *EC*-перехода. Для представления потока событий между ФБ используются дуги типа *es*, а для представления потока данных – дуги типа *dc*. Из всех используемых атрибутов вершин требует пояснения только атрибут *path*. Данный атрибут представляет путь до родительского ссылочного экземпляра в дереве иерархии. Путь представляет собой конкатенацию имен экземпляров ФБ, лежащих на этом пути.

В предложенной метамодели алгоритмы, связанные с *EC*-акцией, специфицируются только на уровне интерфейсов (входов-выходов). Кардинальности связей определяют допустимую структуру взаимосвязей экземпляров вершин.

4 Метамодели арифметических *NCES*-сетей

В данном разделе представлен графический язык модульных *aNCES*-сетей, основанный на их представлении в виде ТАГ. На рис. 7 приведена метамодель (без атрибутов) используемой в работе доменно-ориентированной *aNCES*-сети с учетом следующих упрощений: 1) используется один доменно-ориентированный арифметический переход *Coru* для моделирования КД; 2) используется ограниченный набор типов входов-выходов *aNCES*-модулей. Вершины типов *CTI*, *CCI*, *CPI*, *CTO*, *CCO* и *CPO* определяют интерфейс модуля, причем вершина типа *CTI* (*CTO*) представляет событийный вход (выход), *CCI* (*CCO*) – условный вход (выход), *CPI* (*CPO*) – вход (выход) по данным. Вершины типов *TI*, *CI*, *PI*, *TO*, *CO* и *PO* аналогичны перечисленным вершинам, но они определяют интерфейс ссылочного экземпляра модуля. Вершина типа *T* представляет переход сетевой модели, вершина типа *P* – позицию сетевой модели, а вершина типа *Module* – ссылочный экземпляр модуля. Дуги типа *b* определяют принадлежность интерфейсных вершин определенному ссылочному экземпляру модуля. Дуги типа *pt* и *tp* представляют связи между позициями и переходами и переходами и позициями соответственно. Связь типа *ev* служит для определения событийных дуг, а типа *c* – условных дуг. Дуги типа *ra* и *ap* являются арифметическими.

Следует заметить, что метамодели конкретных типов и систем *NCES* могут быть получены из приведенной метамодели путем удаления определенных структурных элементов или в результате манипулирования с кратностью вершин. Например, чтобы из приведенной метамодели получить метамодель базисного модуля *NCES*-сети, достаточно положить кратность всех вершин, кроме вершин *CTI*, *CCI*, *CTO*, *CCO*, *T* и *P*, равной нулю.

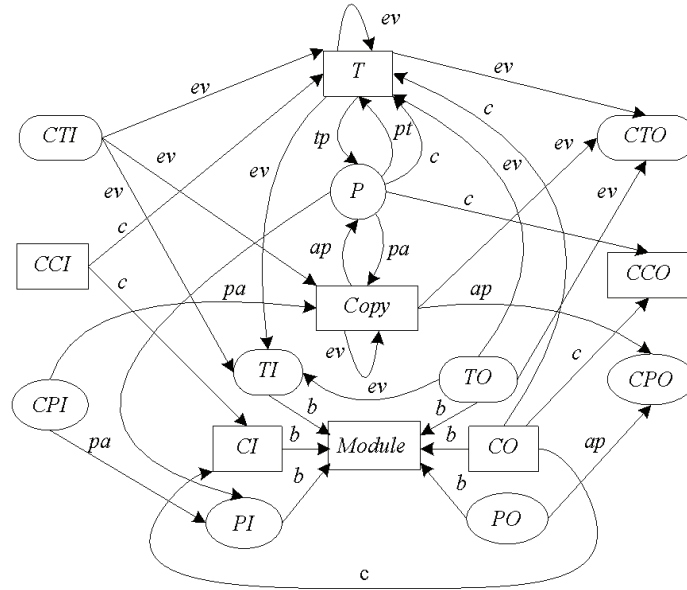


Рис. 7 Мета модель модуля многоуровневой aNCES-сети

5 Правила перехода от многоуровневых к одноуровневым системам ФБ

Переход от многоуровневой структуры системы ФБ к одноуровневой структуре производится в два этапа. На первом этапе (этапе компоновки) рекурсивно осуществляется замена ссылочных экземпляров ФБ на соответствующие им развернутые экземпляры. На втором этапе (этапе встраивания) производится встраивание развернутых экземпляров ФБ в окружающую среду.

Все правила перехода к одноуровневому представлению систем ФБ можно разбить на два класса: правила компоновки и правила встраивания развернутых экземпляров.

С использованием правил первого вида представляются типы ФБ. Правила второго вида делятся на правила: 1) создания КД; 2) связывания КД по событийным и информационным линиям; 3) связывания КД по *WITH*-связям; 4) удаления ненужных элементов.

В свою очередь правила создания КД включают правила: 1) создания разветвителей (входных/выходных); 2) копировщиков (входных/выходных).

Правила для создания КД являются однотипными, поэтому рассмотрим их на примере правила создания входного разветвителя *DV_E* (рис. 8). Вершина типа *EI* определяет событийный вход ссылочного экземпляра ФБ. Правило применяется при выполнении следующих условий по атрибутам: 1) $EI.nameM = CEI.path$; 2) $EI.name = CEI.name$. Слева от правила записано *NAC*-условие, представляющее собой граф, который определяет запрещенную графовую структуру. В данном случае условие *NAC* предназначено для исключения дублирования разветвителей.

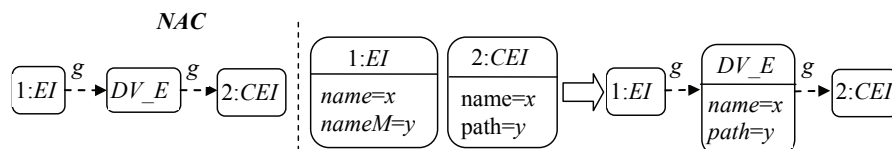


Рис. 8 Правило создания входного разветвителя клапана данных

6 Правила синтеза многоуровневых *aNCES*-сетей на основе одноуровневых систем ФБ

Правила синтеза многоуровневых *aNCES*-сетей на основе одноуровневых систем ФБ по сути определяют семантику ФБ в нотации *aNCES*. Их можно разделить на следующие группы правил: 1) правила создания элементов; 2) правила связывания элементов; 3) правила создания и связывания элементов; 4) правила замены элементов; 5) правила установки атрибутов элементов; 6) правила удаления элементов. Всего разработано 41 правило синтеза. Все перечисленные правила имеют один и тот же приоритет, за исключением правил удаления, приоритет которых ниже.

В качестве примера правила класса 3 рассмотрим правило, представленное на рис. 9. Данное правило создает переход сетевой модели, моделирующий *ЕС*-переход, встраивает данный переход сетевой модели в общую сетевую модель *ЕСС* и соединяет событийной дугой выход *true* соответствующего (уже существующего) *Cond*-модуля с созданным переходом. На рис. 9 переменная *x* определяет текущее значение счетчика переходов. Под *Cond*-модулем понимается модуль *aNCES*-сети, предназначенный для вычисления условия *ЕС*-перехода.

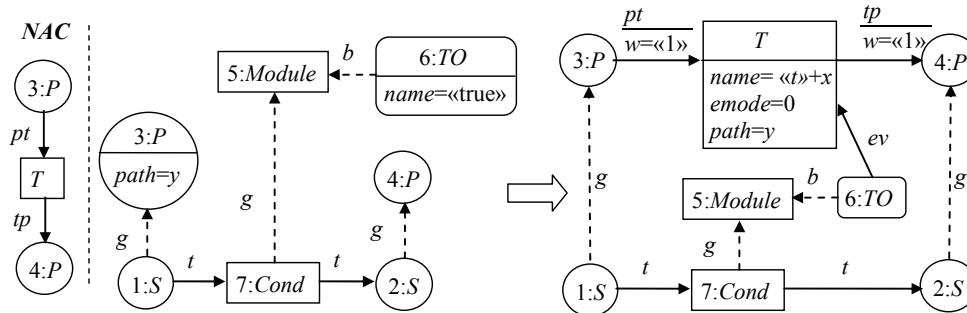


Рис. 9 Правило создания перехода сетевой модели, имитирующего *ЕС*-переход, и его встраивание в *NCES*-модель *ЕСС*

Пример. В качестве примера рассмотрим синтез целочисленной *aNCES*-модели для простейшей системы, включающей один функциональный блок типа *E_SR*, представляющий *RS*-триггер (рис. 10). Алгоритм *SET* устанавливает выходную булеву переменную в значение «Истина», а алгоритм *RESET* – в «Ложь».

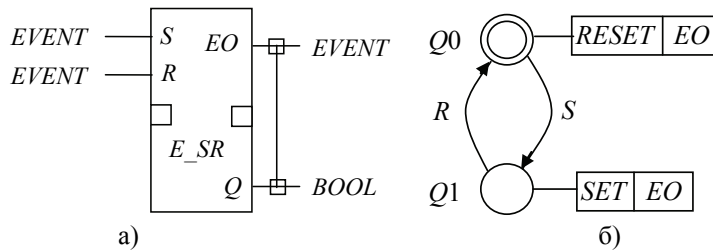


Рис. 10 Графическое представление ФБ *E_SR*: интерфейс ФБ (а) и диаграмма *ЕСС* (б)

Представление ФБ E_SR в виде правила перезаписи графов в системе AGG приведено на рис. 11. Правая часть правила построена в соответствии с метамоделью базисного ФБ и с учетом положений о построении шаблонов правил компоновки. Графовое представление простой системы функциональных блоков, включающей один ФБ E_SR , изображено на рис. 12. Эта система соответствует метамодели составных ФБ.

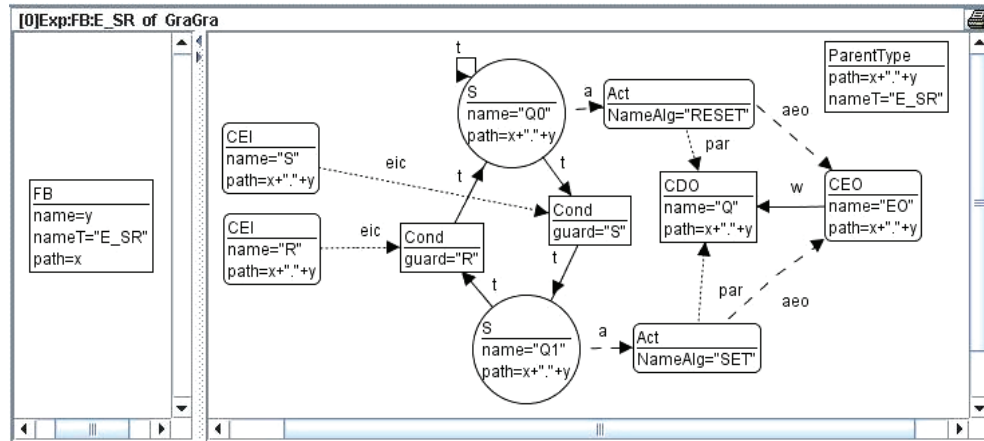


Рис. 11 Представление (типа) функционального блока E_SR в виде правила перезаписи графов в системе AGG

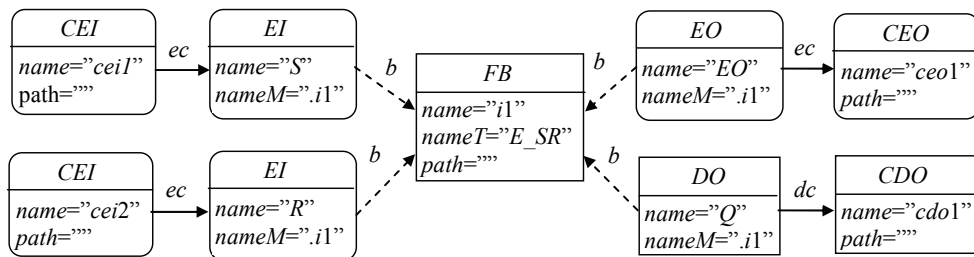


Рис. 12 Система ФБ, включающая один функциональный блок E_SR

На рис. 13 изображена модульная $aNCES$ -сеть, моделирующая систему ФБ, содержащую один ФБ типа E_SR . Графовое представление этой $aNCES$ -сети было получено путем последовательных преобразований графового представления системы ФБ (рис. 11, 12) на основе применения правил в системе AGG [12].

Следует отметить, что $NCES$ -модуль типа $ControlECC$ на рис. 13 представляет управляющую часть интерпретатора ECC . Модуль $CondEVENT$ предназначен для вычисления условия, включающего только один событийный вход. Модули $Alg_E_SR_SET$ и $Alg_E_SR_RESET$ представляют алгоритмы установки выходной булевой переменной Q в значение «Истина» (1) и «Ложь» (0), соответственно. Одноуровневое представление сетевой модели может быть получено путем раскрытия модулей $aNCES$ -сети.

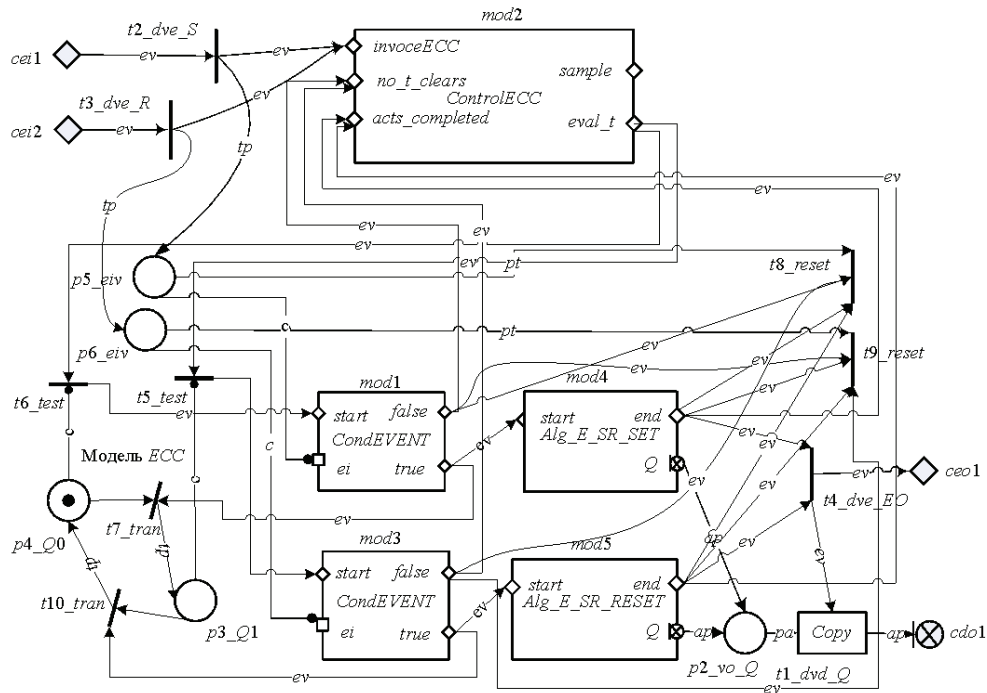


Рис. 13 Модульная aNCES-сеть, представляющая систему ФБ на рис. 11, 12

Заключение

В работе кратко рассмотрен подход на основе преобразований графов для синтеза формальных моделей систем ФБ IEC 61499. Данный подход положен в основу прототипа синтезирующей системы, реализованного с помощью системы трансформации графов AGG. Из-за лимита печатного места в работе не рассмотрены вопросы моделирования систем ФБ с помощью aNCES-сетей, а также не представлены в достаточной мере правила преобразования графов.

Список литературы

1. Function blocks for industrial-process measurement and control system. – Part 1: Architecture, International Electrotechnical Commission Geneva, 2005.
2. **Vyatkin, V.** Rapid engineering and re-configuration of automation objects using formal verification / V. Vyatkin V., H.-M. Hanisch, S. Karras, T. Pfeiffer, V. Dubinin // International Journal of Manufacturing Research. – 2006. – V. 1. – № 4. – P. 382–404.
3. **Hanisch, H.-M.** Netz-Condition/Event-Systeme. 4. Fachtagung Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA'95) / H.-M. Hanisch, M. Rausch. – Braunschweig, Mai 1995, Tagungsband. – S. 55–71.
4. **Vyatkin, V.** A Modeling Approach for Verification of IEC 61499 Function Blocks Using Net Condition/Event Systems / V. Vyatkin, H.-M. Hanisch // Emerging technologies and factory automation (ETFA'99) : IEEE Int. Conf. – 1999. – P. 261–270.
5. **Pang, C.** Towards Formal Verification of IEC61499: modelling of Data and Algorithms in NCES / C. Pang, V. Vyatkin // IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN'2007). – Vienna, 2007. – P. 879–884.
6. **Lueder, A.** Formal models for the verification of IEC 61499 function block based control applications / A. Lueder, C. Schwab, M. Tangermann, J. Peschke // Emerging technologies and factory automation (ETFA'2005) : IEEE Int. Conf. Catania. – 2005. – P. 105–112.

7. **Ivanova-Vasileva, I.** Transformation of IEC 61499 control systems to formal models / I. Ivanova-Vasileva, C. Gerber, H.-M. Hanisch // *Automatics and Informatics (CAI'07)*. – Sofia. – 2007. – P. 5–10.
8. **Sendall, S.** Model transformation: The heart and soul of model-driven software development / S. Sendall, W. Kozaczynski // *IEEE Software. Special Issue on Model-Driven Software Development*. – 2003. – № 20 (5). – P. 42–45.
9. **Ehrig, H.** Fundamental theory for typed attributed graph transformation / H. Ehrig, U. Prange, G. Taenzer // *Graph Transformation: 2nd Int. Conf. (ICGT 2004)*. Lecture Notes in Computer Science. – Springer-Verlag, 2004. – V. 3256. – P. 161–177.
10. **Дубинин, В. Н.** Рефакторинг диаграмм управления выполнением стандарта *IEC 61499* / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2008. – № 2. – С. 16–25.
11. AGG Web-сайт <http://tfs.cs.tu-berlin.de/agg>
12. **Dubin, V.** Towards a Formal Semantics of IEC 61499 Function Blocks / V. Dubin, V. Vyatkin // *IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics (INDIN'2006)*, Singapore. – 2006. – P. 6–11.

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ

Рассмотрены проблемы анализа информационной структуры корпоративной сети. Сформулированы основные принципы анализа структуры. Решены задачи описания структуры и вычисления характеристик структуры: интенсивностей потоков данных между узлами сети, нагрузка на узлы и структурообразующее оборудование сети.

Введение

Структура корпоративной сети является основным фактором, влияющим на качество обмена данными между прикладным программным обеспечением корпоративной системы, и, соответственно, на качество решения прикладных задач. Анализ структуры является необходимым условием при выборе вариантов построения корпоративной сети и управления сетью [2, 3]. Результатами анализа должны стать численные значения характеристик сети: нагрузка каналов связи и структурообразующего оборудования, интенсивности потоков данных и запросов, поступающих на узлы сети [1, 2]. Указанные характеристики должны вычисляться с учетом специфических особенностей конкретной структуры сети.

1 Общие проблемы и принципы анализа структуры корпоративной сети

Проблемы анализа структуры корпоративной сети заключаются в том, что отсутствует единый подход к формированию структуры (в настоящее время существует, как минимум, несколько технологий проектирования сетей), имеется явная зависимость характеристик сети от параметров прикладных задач, решаемых в сетевой среде, отсутствуют отработанные математические методы формального описания структуры сети [2, 3].

Все это требует разработки принципов анализа структуры сети, инвариантных относительно технологии создания сети, решаемых прикладных задач, используемого для построения сети оборудования.

Для построения сети необходимо знать ее информационную структуру, которая определяет информационные потоки между узлами, на которых установлено программное обеспечение корпоративной системы. Под информационной структурой сети будем понимать совокупность информационных ресурсов корпоративной системы, размещенных на узлах сети, и информационных потоков между узлами, возникающих при решении прикладных задач. Узлом информационной структуры будем называть место размещения ресурса (приложения, базы данных), где обеспечивается его работа. Располагая данными об информационной структуре сети, можно принимать решения об организации каналов связи между узлами сети, определять необходимые параметры каналов связи и сетевого оборудования, формировать техническую структуру сети.

Под технической структурой будем понимать совокупность реального структурообразующего оборудования, узлов и каналов связи, составляющих полностью связанную сеть. Узлом технической структуры будем называть совокуп-

ность реальных технических средств, реализующих узел информационной структуры и обеспечивающих работу установленных ресурсов.

Для полноценного анализа структуры сети необходимо провести анализ ее информационной и технической структур, связать результаты анализа. Связывание результатов анализа информационной и технической структур подразумевает отображение параметров и характеристик информационной структуры в параметры технической структуры и определение параметров и характеристик технической структуры.

Схема проведения анализа структуры сети приведена на рис. 1.



Рис. 1 Схема анализа структуры корпоративной сети

2 Описание и расчет характеристик информационной структуры корпоративной сети

Отметим, что источниками потоков данных в сети являются пользователи и приложения. Пользователи иницируют работу приложений, которые в свою очередь обращаются к базам данных, к другим приложениям, передавая и получая различную информацию.

Работа приложений определяется задачами, которые решаются системой. Число задач в системе обозначим L .

Будем считать для упрощения, что каждое приложение, независимо от того, в какой задаче оно используется, работает всегда одинаково. Так что если в зависимости от задачи меняется работа приложения, то будем считать, что это уже другое приложение.

Под приложением будем понимать программу, которая запускается при решении задачи, программа может быть как специальной, написанной для решения задачи, так и общесистемной, предназначенной для выполнения стандартных процедур, которые требуются при решении задачи.

В каждой системе имеются хранилища данных, которые в нашем случае будем называть базами данных; их число в системе обозначим R . Считаем, что базы данных сформированы, состав данных определен и определены приложения, которые работают с базами данных.

Пусть число узлов сети M , количество пользователей системы N . Пусть в системе функционирует D различных приложений. Приложения предназначены для решения прикладных задач при обслуживании пользователей корпоративной системы.

Каждая задача номер k характеризуется следующим набором параметров: $S_k = \{p_k, d_k, u_k, W_k\}$, ($k = 1, 2, \dots, L$).

Вектор-строка $p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kD})$ определяет приложения, которые исполняются при выполнении задачи номер k , при этом $p_{ki} = 1$, если приложение номер i выполняется при решении задачи номер k , и $p_{ki} = 0$, если приложение номер i не выполняется при решении задачи номер k ($i = 1, 2, \dots, D$; $k = 1, 2, \dots, L$). Для всех элементов вектор-строки p_k должно выполняться

условие $\sum_{i=1}^D p_{ki} \geq 1$, означающее, что при решении задачи номер k используется хотя бы одно приложение.

Из вектор-строк $p_k = (p_{k1}, p_{k2}, \dots, p_{kD})$ можно составить матрицу $P = \|p_{ki}\|$, задающую связи между задачами системы и приложениями.

Вектор-строка $d_k = (d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kR})$ определяет базы данных, которые используются при выполнении задачи номер k , при этом $d_{ki} = 1$, если база данных номер i используется при решении задачи номер k , и $d_{ki} = 0$, если база данных номер i не используется при решении задачи номер k ($i = 1, 2, \dots, R$; $k = 1, 2, \dots, L$). Для всех элементов вектор-строки d_k должно выполняться усло-

вие $\sum_{i=1}^R d_{ki} \geq 0$, означающее, что при решении задачи номер k может не исполь-

зоваться ни одной базы данных. Из вектор-строк $\mathbf{d}_k = (d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kR})$ можно составить матрицу $\mathbf{D} = \|\mathbf{d}_{ki}\|$, задающую связи между задачами системы и базами данных.

Вектор-строка $\mathbf{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kN})$ определяет множество пользователей системы, которым требуется запускать задачу номер k , при этом $u_{kj} = 1$, если пользователь номер j запускает задачу номер k , и $u_{kj} = 0$, если пользователь номер j не запускает задачу номер k ($j = 1, 2, \dots, N$; $k = 1, 2, \dots, L$). Для всех элементов вектор-строки $\mathbf{u}_k$ должны выполняться условия:

$$1. \forall k = 1, 2, \dots, L; \sum_{j=1}^N u_{kj} \geq 1, \text{ т.е. каждая задача запускается хотя бы од-}$$

ним пользователем.

$$2. \forall j = 1, 2, \dots, N; \sum_{k=1}^L u_{kj} \geq 1, \text{ т.е. каждый пользователь запускает хотя бы}$$

одну задачу. Из вектор-строк $\mathbf{u}_k = (u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kN})$ можно составить матрицу $\mathbf{U} = \|\mathbf{u}_{kj}\|$, определяющую потребности пользователей системы в запуске задач.

Матрица $\mathbf{W}_k = \|\mathbf{w}_{kij}\|$, ($i = 1, 2, \dots, D$; $j = 1, 2, \dots, D$) определяет последовательность запуска приложений при решении задачи номер k . Так, $w_{kij} = 1$, если приложение номер j при решении задачи k запускается после окончания работы приложения номер i ; $w_{kij} = 0$, если приложение номер j при решении задачи k не запускается после окончания работы приложения номер i . Кроме того, $w_{kii} = 1$, если приложение номер i запускается первым при решении задачи k . Если приложение j при решении задачи k запускается последним, то

$$\sum_{m=1}^D w_{kjm} = 0 \text{ и } \sum_{m=1}^D w_{kmj} \geq 1.$$

Каждый i -й пользователь характеризуется интенсивностью потока запросов на запуск задач в системе – $\lambda_{ij} \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, L$). Здесь λ_{ij} – интенсивность потока запросов от пользователя номер i на запуск задачи номер j . Множество интенсивностей потоков запросов от пользователей на запуск задач будем задавать матрицей $\mathbf{\Lambda} = \|\lambda_{ij}\|$. Очевидно, что $\lambda_{ij} = 0$, если $u_{ji} = 0$, т.е. интенсивность потока запросов на запуск задачи j от пользователя i равна нулю, если этот пользователь не запускает задачу.

Каждое приложение номер m , используемое при решении задачи k , будем задавать набором: $\mathbf{A}_{km} = \{\mathbf{v}_{km}, \mathbf{b}_{km}\}$, ($k = 1, 2, \dots, L$; $m = 1, 2, \dots, D$). Здесь вектор-строка $\mathbf{v}_{km} = (v_{km1}, v_{km2}, \dots, v_{kmR})$ определяет объемы данных, которыми обменивается приложение m с базами данных за один сеанс решения задачи k . Так, $v_{kmr} \geq 0$ – объем данных, которыми обменивается приложение m с базой данных r . Из вектор-строк $\mathbf{v}_{km} = (v_{km1}, v_{km2}, \dots, v_{kmR})$ можно составить матри-

цы $\mathbf{V}_k = \|v_{kmr}\|$, ($m = 1, 2, \dots, D$; $r = 1, 2, \dots, R$), задающие объемы передаваемых данных между приложениями и базами данных при решении задач.

Вектор-строка $\mathbf{b}_{km} = (b_{km1}, b_{km2}, \dots, b_{kmD})$ определяет объемы данных, которыми обменивается приложение номер m с другими приложениями при решении задачи номер k . Так, $b_{kmj} \geq 0$ – объем данных, которыми обменивается приложение m с приложением j . Из вектор-строк $\mathbf{b}_{km} = (b_{km1}, b_{km2}, \dots, b_{kmD})$ можно составить матрицы $\mathbf{B}_k = \|b_{kmd}\|$, ($m = 1, 2, \dots, D$; $d = 1, 2, \dots, D$), задающие объемы передаваемых данных между приложениями.

Таким образом, интенсивности и объемы потоков данных в сети корпоративной системы определяются интенсивностями запуска задач пользователями и запускаемыми при этом приложениями. Здесь условимся, что объем передаваемых по сети данных задается в установленных единицах, например, байтах.

Зададим размещение приложений по узлам сети с помощью матрицы $\mathbf{G} = \|g_{ij}\|$, где $g_{ij} = 1$, если приложение номер i установлено на узле номер j , и $g_{ij} = 0$, если приложение номер i не установлено на узле номер j (здесь $i = 1, 2, \dots, D$; $j = 1, 2, \dots, M$). Для элементов матрицы $\mathbf{G}$ должны выполняться условия:

1. Для любого $j = 1, 2, \dots, M$ справедливо неравенство $\sum_{i=1}^D g_{ij} \geq 1$, т.е. на

каждом узле должно быть установлено хотя бы одно приложение, но на узле может быть установлено и несколько приложений.

2. Для любого $i = 1, 2, \dots, D$ справедливо неравенство $\sum_{j=1}^M g_{ij} = 1$, т.е. ка-

ждое приложение должно быть установлено только на одном узле.

Из приведенных условий следует, что общее количество установленных на узлах приложений равно общему количеству приложений $\sum_{i=1}^D \sum_{j=1}^M g_{ij} = D$.

Подключение пользователей к узлам задается матрицей $\mathbf{H} = \|h_{ij}\|$, где $h_{ij} = 1$, если пользователь номер i подключен к узлу номер j , и $h_{ij} = 0$, если пользователь номер j не подключен к узлу номер i ($i = 1, 2, \dots, N$; $j = 1, 2, \dots, M$). Для элементов матрицы $\mathbf{H}$ выполняются условия:

1. $\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_{ij} = M$, т.е. все пользователи системы должны быть подклю-

чены к узлам сети системы.

2. Для любого $i = 1, 2, \dots, N$ справедливо равенство $\sum_{j=1}^M h_{ij} = 1$, т.е. каж-

дый пользователь должен быть подключен только к одному узлу (этот узел является рабочим местом пользователя).

3. Для любого $j = 1, 2, \dots, M$ справедливо неравенство $0 \leq \sum_{i=1}^N h_{ij} \leq N$, т.е.

к любому узлу может быть либо подключено несколько пользователей, либо ни одного.

Распределение баз данных по узлам сети задается матрицей $S = \|s_{rm}\|$, где $s_{rm} = 1$, если база данных номер r размещена на узле номер m , и $s_{rm} = 0$, если база данных номер r не размещена на узле сети номер m , ($r = 1, 2, \dots, R$; $m = 1, 2, \dots, M$). Для элементов матрицы должны выполняться следующие условия:

1. $\sum_{r=1}^R \sum_{m=1}^M s_{rm} = R$, т.е. все базы данных системы должны быть размещены на узлах сети системы.

2. Для любого $r = 1, 2, \dots, R$ справедливо равенство $\sum_{m=1}^M s_{rm} \geq 1$, т.е. каждая база данных может быть размещена более чем на одном узле сети, что на практике соответствует, например, репликации данных.

3. Для любого $m = 1, 2, \dots, M$ справедливо неравенство $\sum_{r=1}^R s_{rm} \geq 0$, т.е.

на любом узле может быть размещено либо несколько баз данных, либо ни одной.

Здесь распределенную базу данных будем рассматривать как совокупность отдельных баз данных.

Пример 1. Описание информационной структуры сети.

В качестве примера приведено описание информационной структуры для случая решения трех задач (задачи 1–3).

Считаем, что число пользователей системы $N = 6$, число узлов $M = 10$, число приложений $D = 7$, число баз данных $R = 3$. При этом одна база номер 3 используется двумя задачами. Пользователи 3 и 6 задачи не запускают.

Задачи 1, 2, 3 задаются следующими наборами:

$S_1 = \{p_1, d_1, u_1, W_1\}$, где $p_1 = (1, 1, 0, 0, 0, 0, 0)$, $d_1 = (0, 1, 0)$, $u_1 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$;

$S_2 = \{p_2, d_2, u_2, W_2\}$, где $p_2 = (0, 0, 0, 1, 1, 0, 0)$, $d_2 = (0, 0, 1)$, $u_2 = (0, 0, 0, 1, 0, 0)$;

$S_3 = \{p_3, d_3, u_3, W_3\}$, где $p_3 = (0, 0, 1, 0, 0, 1, 1)$, $d_3 = (1, 0, 1)$, $u_3 = (0, 1, 0, 0, 1, 0)$;

$$W_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad W_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{W}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Используемые приложения задаются наборами:

$\mathbf{A}_{11} = \{\mathbf{v}_{11}, \mathbf{b}_{11}\}$, где $\mathbf{v}_{11} = (0, 100, 0)$, $\mathbf{b}_1 = (0, 10, 0, 0, 0, 0, 0)$;

$\mathbf{A}_{12} = \{\mathbf{v}_{12}, \mathbf{b}_{12}\}$, где $\mathbf{v}_{12} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{b}_{12} = (5, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$;

$\mathbf{A}_{33} = \{\mathbf{v}_{33}, \mathbf{b}_{33}\}$, где $\mathbf{v}_{33} = (50, 0, 50)$, $\mathbf{b}_3 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 10)$;

$\mathbf{A}_{24} = \{\mathbf{v}_{24}, \mathbf{b}_{24}\}$, где $\mathbf{v}_{24} = (0, 0, 100)$, $\mathbf{b}_{24} = (0, 0, 0, 0, 10, 0, 0)$;

$\mathbf{A}_{25} = \{\mathbf{v}_{25}, \mathbf{b}_{25}\}$, где $\mathbf{v}_{25} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{b}_{25} = (0, 0, 0, 10, 0, 0, 0)$;

$\mathbf{A}_{36} = \{\mathbf{v}_{36}, \mathbf{b}_{36}\}$, где $\mathbf{v}_{36} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{b}_{36} = (0, 0, 20, 0, 0, 0, 0)$;

$\mathbf{A}_{37} = \{\mathbf{v}_{37}, \mathbf{b}_{37}\}$, где $\mathbf{v}_{37} = (0, 0, 0)$, $\mathbf{b}_{37} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$.

Считаем, что при запуске одного приложения другим возможен взаимный обмен данными. При этом объемы передаваемых данных задаются в одинаковых единицах измерения.

Матрицы $\mathbf{H}$ и $\mathbf{G}$ имеют вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрицы $\mathbf{S}$ и $\mathbf{P}$ имеют вид

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрицы $\mathbf{U}$ и $\mathbf{D}$ имеют вид

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

На рис. 2 приведена информационная структура сети, соответствующей заданному описанию.

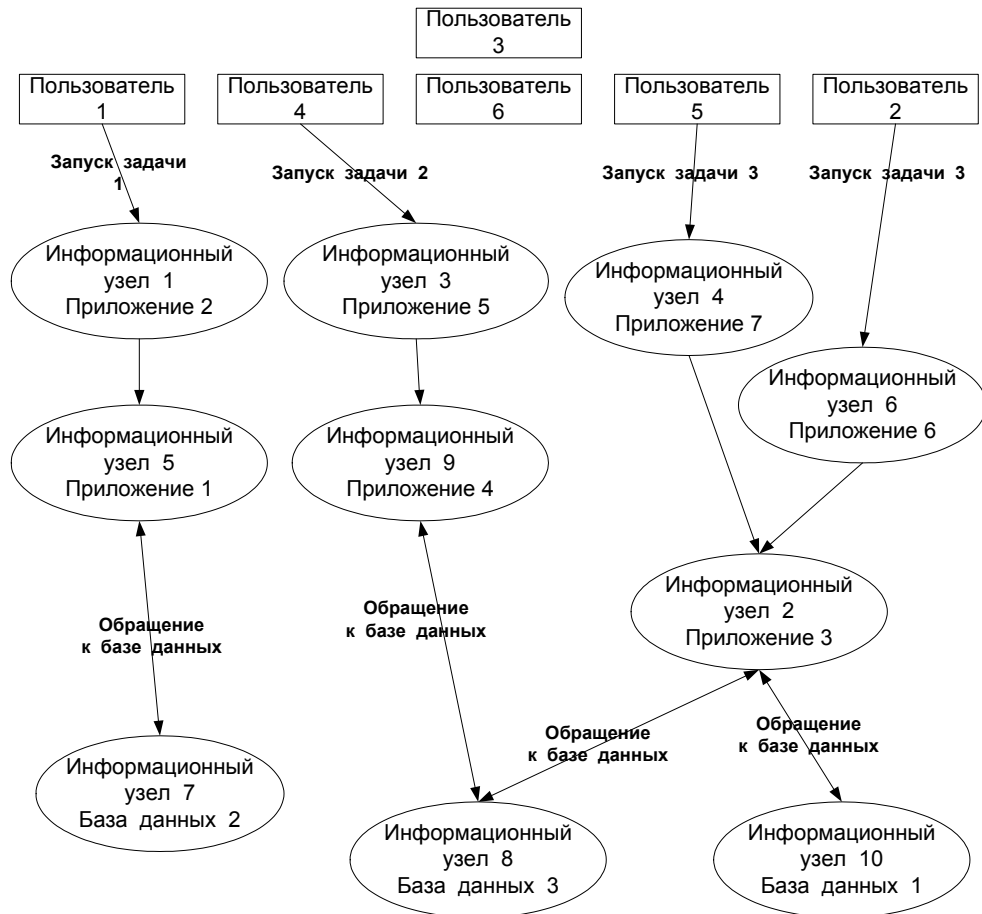


Рис. 2 Информационная структура сети

Таким образом, информационная структура сети корпоративной системы может быть задана набором следующих данных (параметров):

$$\mathbf{SI} = \{N, M, D, L, R, S_i = \{p_i, d_i, u_i, W_i\} (i = 1, 2, \dots, L), \\ \mathbf{A}_{km} = \{v_{km}, b_{km}\} (k = 1, 2, \dots, L; m = 1, 2, \dots, D), \mathbf{G}, \mathbf{H}, \mathbf{S}\}.$$

3 Расчет параметров потоков данных между узлами информационной структуры сети

Используя введенные средства описания (определения, задания) информационной структуры сети в виде набора данных, можно определить параметры потоков данных между узлами сети.

Как уже отмечалось выше, источниками потоков данных являются запросы пользователей на запуск задач и запускаемые для решения задач приложения.

Значения элементов матрицы Λ интенсивностей потоков запросов пользователей на запуск задач определяются спецификой работы пользователей корпоративной сети, будем считать их известными.

Очевидно, что потоки запросов пользователей сначала поступают на те узлы сети, к которым прикреплены пользователи. Закрепление пользователей за узлами задается матрицей $\mathbf{H}$, определенной ранее.

Суммарная интенсивность потока запросов λ_k на запуск задачи k вычисляется по формуле

$$\lambda_k = \sum_{i=1}^N \lambda_{ik} \quad (k = 1, 2, \dots, L). \quad (1)$$

Если ввести вектор-строку интенсивностей запуска задач в системе $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L)$, то ее можно вычислить, используя (1), по формуле

$$\lambda = \mathbf{e}_N \mathbf{\Lambda}, \quad (2)$$

где $\mathbf{e}_N$ – единичный вектор-строка размерности N .

Рассмотрим вектор-строку $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_D)$:

$$\gamma = \lambda \mathbf{P}, \quad (3)$$

где элемент номер j вычисляется по формуле $\gamma_j = \sum_{k=1}^L \lambda_k p_{kj}$, что означает

суммарную интенсивность запуска приложения номер j всеми задачами, решаемыми системой.

Таким образом, вектор-строка γ определяет интенсивности запуска приложений в корпоративной сети.

Определим суммарные объемы данных, передаваемых между узлами сети при решении задачи k . Пусть $\mathbf{Z}_k = \|z_{kij}\|$ – матрица, каждый элемент которой z_{kij} равен суммарному объему данных, передаваемому между узлами сети i и j при решении задачи k . Тогда можно записать, что

$$z_{kij} = \sum_{r=1}^D g_{ri} p_{kr} \left(\sum_{m=1}^D g_{mj} p_{km} b_{rm} \right) + \sum_{r=1}^D g_{ri} p_{kr} \left(\sum_{m=1}^R s_{mj} d_{km} v_{rm} \right), \quad (4)$$

$k = 1, 2, \dots, L$; $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, M$.

В формуле (4) первое слагаемое – объемы данных, передаваемых между всеми приложениями, используемыми задачей k и установленными на узлах i и j . Второе слагаемое – объемы данных, передаваемых между всеми приложениями и базами данных, используемыми задачей k и установленными на узлах i и j .

Используя (4) можно определить интенсивности потоков данных между узлами сети при решении задачи k . Естественно, что эти интенсивности определяются интенсивностью запуска задачи k всеми пользователями сети.

Здесь считаем, что каждое приложение, используемое при решении задачи, запускается один раз, хотя это ограничение легко обойти.

Матрица интенсивностей потоков данных между узлами сети при решении задачи k вычисляется по формуле

$$\mathbf{A}_k = \lambda_k \mathbf{Z}_k, \quad (k = 1, 2, \dots, L). \quad (5)$$

Формулу (5) можно записать и так: $\mathbf{A}_k = \|\alpha_{kij}\|$, где $\alpha_{kij} = \lambda_k z_{kij}$ ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, M$), α_{kij} – суммарная интенсивность потоков данных между узлами i и j при решении задачи k .

Теперь, используя (4), можно определить суммарные интенсивности потоков данных, передаваемых между информационными узлами. Эти интенсивности задаются матрицей

$$\mathbf{A} = \sum_{k=1}^L \mathbf{A}_k, \quad (6)$$

или $\mathbf{A} = \|\alpha_{ij}\|$, где $\alpha_{ij} = \sum_{k=1}^L \alpha_{kij} = \sum_{k=1}^L \lambda_k z_{kij}$ ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, M$) – суммарная интенсивность потоков данных, передаваемых от узла i к узлу j .

Формулы (5) и (6) определяют загрузку каналов связи и коммуникационного оборудования сети.

Определим теперь нагрузку на информационные узлы. Будем исходить из того, что нагрузка на узел, на котором установлены приложения (базы данных) определяется интенсивностью потока запросов к этим приложениям (базам данных). Из формулы (3) известны интенсивности запуска приложений, установленных на узлах сети γ_j ($j = 1, 2, \dots, D$). Используя эти данные и данные о распределении приложений по узлам (матрица $\mathbf{G}$), получим формулу для вычисления интенсивности потока запросов на запуск приложения j , установленного на узле i :

$$\beta_{ji} = \gamma_j g_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, D; \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

Это равенство можно для всех j и i записать в матричной форме в виде

$$\mathbf{B}^* = \|\beta_{ji}\| = \mathbf{\Gamma}_{dg} \mathbf{G},$$

где $\mathbf{\Gamma}_{dg} = \|\gamma_{ij}^*\|$ – диагональная матрица, у которой $\gamma_{ii}^* = \gamma_i$ и $\gamma_{ij}^* = 0$, если $i \neq j$, ($j = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, D$).

Очевидно, что если $\beta_{ji} = 0$, то это значит, что приложение номер j не установлено на узле номер i . Формула (7) позволяет вычислить значение интенсивности потока запросов на запуск приложения от всех задач.

Для вычисления интенсивности потока запросов на запуск приложения номер j на узле i только от задачи k можно воспользоваться формулой

$$\beta_{kji} = \lambda_k g_{ji} p_{kj}, \quad k = 1, 2, \dots, L; \quad j = 1, 2, \dots, D; \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

Из формул (8) и (7) следует, что $\beta_{ij} = \sum_{k=1}^L \beta_{kji}$.

Если на узле i установлена база данных, можно определить интенсивность потока запросов к базе данных j при решении задачи k :

$$\phi_{kji} = \lambda_k s_{ji} d_{kj}, \quad k = 1, 2, \dots, L; \quad j = 1, 2, \dots, R; \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (9)$$

Из выражения (9) получим формулу для вычисления суммарной интенсивности потока запросов к базе данных j , установленной на узле i при решении задач:

$$\varphi_{ji} = \sum_{k=1}^L \lambda_k s_{ji} d_{kj} = \sum_{k=1}^L \varphi_{kij}, \quad j=1, 2, \dots, R; \quad i=1, 2, \dots, M. \quad (10)$$

Здесь если $\varphi_{ji} = 0$, то на узле i не установлена база данных номер j .

Из величин φ_{ji} , вычисляемых по формуле (10), можно составить матрицу: $\Phi = \|\varphi_{ji}\|$, $j=1, 2, \dots, R; \quad i=1, 2, \dots, M$.

Отметим, что формулы (7) и (10) предусматривают также случаи, когда на одном узле установлено несколько приложений или несколько баз данных. Тогда суммарная интенсивность потока запросов на запуск приложений, установленных на узле i , вычисляется по формуле $\beta_i = \sum_{j=1}^D \beta_{ji}$, а суммарная ин-

тенсивность потока запросов к базам данных, установленным на узле i , вычисляется по формуле $\varphi_i = \sum_{j=1}^R \varphi_{ji}$.

Пример 2. Расчет параметров потоков данных для информационной структуры сети.

Рассчитаем параметры потоков данных для приведенного выше примера информационной структуры (рис. 1).

Матрица интенсивностей запросов пользователей на запуск задач имеет

$$\text{вид } \Lambda^T = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 10 & 0 \end{bmatrix}.$$

Из формул (1) и (2) имеем $\lambda = (10, 5, 20)$. Из формулы (3), используя матрицу $\mathbf{P}$ примера 1, получим: $\gamma = (10, 10, 20, 5, 5, 20, 20)$.

Из выражения (4) можем вычислить матрицы $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \mathbf{Z}_3, \mathbf{A}, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$:

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 1000 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 400 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далее получим, используя (7) и (10):

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Заключение

Предложенный подход к анализу структуры корпоративной сети и полученные результаты анализа информационной структуры позволяют администратору и разработчику сети оценивать загрузку каналов связи и сетевого оборудования при известных параметрах прикладных задач, решаемых на сети и структуре сети, сравнивать варианты структуры сети.

Список литературы

1. **Олифер, В. Г.** Новые технологии и оборудование IP-сетей / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб. : БХВ-Санкт-Петербург, 2000. – 512 с.
2. **Ретана, С.** Принципы проектирования корпоративных IP-сетей : пер. с англ. / С. Ретана, Д. Слайс, Р. Уайт. – М. : Вильямс, 2002. – 368 с.
3. **Таненбаум, Э.** Распределенные системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стеен. – СПб. : Питер, 2003. – 877 с.

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРИНЯТИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваются методы формирования, оптимизации и принятия проектных стратегий при автоматизированном проектировании корпоративных компьютерных сетей. Представлен интерактивный метод последовательных уступок для задач оптимизации концептуального проектного решения в условиях определенности исходной информации и предложено решение проблемы выбора базового проекта сети в условиях неопределенности исходной информации.

В процессе создания корпоративных компьютерных сетей необходимо учитывать множество различных ограничений, параметров и условий оптимизации проектных решений. На практике в качестве критерия оптимизации часто выбирают экономический, а такие критерии, как среднее время задержки передачи сообщений, надежность и т.д., используют в качестве ограничений. Но для корпоративных сетей данный подход менее приемлем, т.к. при эксплуатации и модернизации могут возникнуть сбои в их работе. Поэтому для таких сетей необходимо учитывать и ряд других критериев: K_1 – производительность, K_2 – надежность и безопасность, K_3 – расширяемость, K_4 – масштабируемость, K_5 – прозрачность, K_6 – поддержка разных видов трафика, K_7 – управляемость, K_8 – совместимость. Среди условий оптимизации и принятия концептуальных проектных решений в формальном отношении можно выделить следующие: определенные условия, вероятностно-определенные и условия неопределенности [1]. Следовательно, при создании корпоративных компьютерных сетей с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР) возникает необходимость в разработке методов оптимизации и принятия концептуальных проектных решений для различных информационных ситуаций.

1 Метод принятия проектных решений в условиях определенности исходной информации

Используемые методы должны опираться на широкое применение интерактивных режимов [2]. Реализация интерактивных режимов должна обеспечивать следующие основные возможности для лица, принимающего решение (ЛПР):

- выбор пороговых значений заданных критериев в задачах комплексной оценки вариантов;
- изменение граничных условий для задач векторной оптимизации;
- модификация управляемых факторов, т.е. изменение значений коэффициентов в критериальных соотношениях;
- определение относительной важности критериев;
- дополнение и исключение критериев, используемых в конкретной оптимизационной задаче.

Проведенный в работе [3] анализ существующих интерактивных методов многокритериальной оптимизации позволил выделить в качестве пред-

почтительных лексикографические методы для решения задачи комплексной оценки вариантов и метод *STEM* для решения задачи векторной оптимизации. Данные методы не учитывают ряда характерных особенностей задачи формирования и принятия концептуального проектного решения в САПР, однако сочетание принципов, лежащих в их основе, позволяет построить эффективную процедуру поиска удовлетворительного варианта решения.

По аналогии с лексикографическими методами можно ввести понятие «стратегии». Под стратегией понимается совокупность параметров проектируемой сети, претендующих на решение поставленной задачи оптимизации $X = (X_{pr1}, X_{pr2}, \dots, X_{prm})$, где X – стратегия; X_{pri} – допустимые значения параметров сети.

Эффективность выбранной стратегии характеризуется частными критериями проектирования (оптимизации) $K^u_1, K^u_2, \dots, K^u_8$, где под частными критериями понимаются функционалы, определенные на X , u – номер уровня иерархической модели корпоративной компьютерной сети [3, 4]. Множество, состоящее из восьми чисел $K^u_1(X), K^u_2(X), \dots, K^u_8(X)$, полностью характеризует эффективность стратегии. Для решения задачи оптимизации необходимо выбрать стратегию, при которой каждому из восьми критериев обеспечивается возможно большее значение. Вместо критериев, для которых лучшей считается стратегия, соответствующая меньшему значению критерия, берутся новые: $K^u_s = -K^u_s$, где K^u_s – значение критерия s . Условие превосходства одной стратегии над другой: стратегия X^* не хуже стратегии X^+ , формализуется неравенствами

$$K^u_i(X^*) \geq K^u_i(X^+), i = 1, 2, \dots, 8, \quad (1)$$

где K^u_i – критерий с номером i ; X^*, X^+ – рассматриваемые стратегии.

Если $K^u_i(X^*) = K^u_i(X^+)$, $i = 1, 2, \dots, 8$, то считается, что эти стратегии эквивалентны. Стратегия X^+ называется эффективной, если не существует стратегии X^* , для которой выполнялось бы неравенство (1).

При выборе решения в первую очередь интерес представляют именно эффективные стратегии. Одна стратегия может быть предпочтительнее другой по одним критериям и уступать ей по другим. Поэтому основным критерием при отборе из множества эффективных стратегий, являющихся решением поставленной задачи, будет критерий приращения более важного критерия при условии ранжирования частных критериев по важности.

Пусть каждый критерий анализируется не только по важности на всем множестве критериев, но анализируются и подмножества критериев, содержащие в том числе данный критерий, значения которых необходимо рассматривать в совокупности, т.к. именно соотношение между значениями этих критериев определяет реализуемость проекта всей сети. Такую зависимость между критериями можно назвать «целевой зависимостью», определяемой проектировщиком. При этом для каждого критерия определяется «связка» (подмножество критериев, связанных с анализируемым целевой зависимостью). Степень достижения максимума очередного критерия выбирается с учетом анализа совокупности значений «связки» критериев [3]. Следует добиваться приращения более важного критерия за счет возрастания потерь по наименее важным, причем с уменьшением важности увеличивается потеря (уступка) по данному критерию. В основу решения подобного рода задач це-

лесообразно положить принцип метода последовательных уступок (на аналогичных принципах основан метод *STEM*) [4]. Если у рассматриваемого критерия существует «система связей», тогда рассматривается одна «связка», включающая множество критериев MK :

$$MK = \bigcup_{i=1}^n MK_i, \quad (2)$$

где MK_i – множество критериев, входящих в i -ю отдельную «связку»; n – общее число «связок» рассматриваемого критерия.

Процедура решения многокритериальной задачи оптимизации в САПР, соответствующая условиям определенности исходной информации, может быть представлена следующим образом:

1. ЛПР задает допустимые интервалы изменения значений используемых критериев и переменных, а также при необходимости шаг изменения соответствующих переменных.

2. Производится ранжирование критериев основного ряда по важности (в порядке убывания), где под основным рядом понимается множество всех критериев оптимизационной задачи.

3. Для каждого критерия создаются «связки», куда входят критерии с «целевой зависимостью», т.е. приемлемость значений которых можно оценить только по совокупности значений.

4. Выбор допустимой величины уступки производится в интерактивном режиме. Проектировщик указывает несколько значений уступок $\Delta_i^1, \Delta_i^2, \dots, \Delta_i^n$ для i -й переменной, и путем решения задачи

$$K_{i+1}^u(\Delta_i^k) \rightarrow \max, k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

определяются максимальные значения $(i + 1)$ -го критерия, на каждом шаге вычисляется «выигрыш». Сравнивая выигрыш по $(i + 1)$ -му критерию, получаемый на текущем шаге, с выигрышем предыдущего шага, ЛПР производит окончательный выбор уступки на рассматриваемый параметр.

5. Переменные, характеризующие частные стратегии, подобно критериям, ранжируются по свойству мобильности на основании предпочтительности изменения тех или иных параметров корпоративной сети при решении конкретной задачи проектирования. В случае модификации исходной стратегии меняется первая по мобильности переменная. Если изменением данной переменной не удастся достичь приемлемого значения по наиболее важному критерию, то осуществляется переход ко второй переменной и т.д.

6. На каждом итерационном шаге ЛПР выдается информация о значениях критериев оптимизации и текущих значениях параметров, на основании которой выбирается направление поиска удовлетворительного решения. По аналогии с методом *STEM*, на начальном шаге задается матрица частных оптимумов и сообщается ЛПР для оценки максимально возможных значений по отдельным критериям. Это необходимо для анализа целесообразности изменения значения того или иного критерия.

7. Оптимальной считается стратегия, полученная при решении задачи оптимизации критериев последней по важности «связки»:

$$X_{\text{опт}} = \sum_{j=1}^N \sup_{X_i \in T} K_j^u(X_j), \quad (4)$$

где $X_{\text{опт}}$ – оптимальная стратегия; N – общее количество критериев в последней по важности связке; T – множество эффективных стратегий; K_j – критерий с номером j ; u – номер уровня j -го критерия; X_i – стратегия проектирования.

При решении задачи оптимизации предложенным способом актуальным вопросом является выбор величин уступок. Уступки выбирают таким образом, чтобы не нарушалось условие корректности рассматриваемой «связки». Уступки могут быть как положительными, так и отрицательными (их величина и знак определяются лицом, принимающим решения). Уже рассмотренные критерии из начальной совокупности зачисляются в множество удовлетворительных, и на них в дальнейшем назначается уступка. При использовании метода последовательных уступок задача оптимизации концептуального проектного решения корпоративной компьютерной сети в САПР сводится к поочередной максимизации частных критериев и выбору соответствующих величин уступок.

Таким образом, представленный интерактивный метод последовательных уступок является не только корректным с точки зрения выполняемых ЛПР операций, но и учитывает характерные особенности задачи оптимизации концептуального проектного решения в САПР. Данный метод наряду с такими достоинствами метода *STEM*, как возможность решения смешанных нелинейных задач векторной оптимизации с дискретными параметрами и лексикографических методов, позволяющих решать задачи с взаимозависимыми и ранжированными по важности критериями, дает возможность учитывать ранжирование параметров проектируемой сети по мобильности, а также позволяет начинать поиск удовлетворяющего решения с исходной стратегии, задаваемой ЛПР. С помощью разработанного интерактивного метода последовательных уступок можно решать как задачи векторной оптимизации, так и задачи комплексной оценки вариантов, что позволит сократить объем программной реализации подсистемы, производящей анализ и выбор концептуального проектного решения.

2 Формирование и принятие базового проектного решения при неопределенности исходной информации

Решение оптимизационных задач в условиях неопределенности имеет ряд особенностей, причем некоторые из них присущи и вероятностно-определенным условиям (стохастическим задачам) [5]. Общим свойством недетерминированных задач является необходимость варьирования значениями исходных данных.

В условиях неопределенности нельзя требовать при математическом (формализованном) решении задачи получения единственного оптимального варианта. Следует выявить лишь множество, или «область», рациональных решений, а окончательный выбор базового проектного решения корпоративной компьютерной сети делается путем применения различных экспертных процедур. При таком окончательном выборе могут применяться определенные формализованные приемы, однако главная роль принадлежит человеку – проектировщику сети.

2.1 Выбор базового концептуального проектного решения

Можно выделить следующие основные этапы решения задачи выбора базового концептуального проектного решения в САПР [3–5].

Первый этап связан с математической формулировкой задачи, а также с построением многоуровневого комплекса моделей объекта проектирования, позволяющего в дальнейшем производить расчет численных значений критериев качества проектного решения, которые могут использоваться в качестве оценочной функции.

Второй этап – выбор представительного множества сочетаний исходных данных, имеющих неоднозначный характер.

Третий этап – выявление тех вариантов решения X_{pr} , которые в принципе могут оказаться рациональными и должны поэтому подробно исследоваться в процессе решения. Если оптимизируемые параметры X_{pr} непрерывны по своей природе, то данный этап будет также представлять собой «дискретизацию» задачи. На данном этапе проверяется, имеется ли в рассматриваемой ситуации неопределенность выбора, т.е. приводит ли неопределенность исходной информации к неопределенности решения. Если последней неопределенности нет, то решение задачи заканчивается – выявленный единственный оптимальный вариант и принимается к исполнению. Если же неопределенность установлена, то проводится анализ для отбора конкурирующих вариантов ($i = 1, \dots, I$), которые будут рассматриваться на последующих этапах.

Четвертый этап – расчет платежной матрицы – один из наиболее трудоемких в вычислительном отношении. Здесь для каждого оставленного на рассмотрение варианта решения ($i = 1, \dots, I$) оценивается эффект при всех отобранных сочетаниях исходных данных ($s = 1, \dots, S$), т.е. рассчитывается $I \times S$ значений оценочной функции $Z(X_{pr}, y_{pr})$, где X_{pr} – оптимизируемые параметры сети, y_{pr} – случайные величины.

Составление платежной матрицы – центральный момент разработанного подхода к решению задач в условиях неопределенности. Она необходима для корректного сопоставления конкурирующих вариантов. Без платежной матрицы невозможно провести правильное и полное сравнение ситуаций в условиях неопределенности, поэтому предыдущие этапы являются подготовительными для данного. Платежная матрица $\|Z_{is}\|$ дает количественную характеристику ситуации и служит основой для последующего анализа и выбора рациональных вариантов проектных решений.

На этом пятом этапе используются специальные критерии и приемы, а также учитываются интуитивные представления о возможных вероятностях отобранных сочетаний исходных данных [5].

Шестой этап – окончательный выбор варианта решения.

Участие человека предполагается на всех этапах, кроме четвертого.

2.2 Формирование и расчет платежной матрицы

Платежная матрица представляет собой таблицу из I строк и S столбцов [3, 5]. В клетках таблицы записываются значения оценочной функции Z_{is} , полученные для варианта решения X_{pri} при сочетании исходных данных y_{prs} . Расчет платежной матрицы должен выполняться в соответствии с принятой постановкой задачи и установленным видом оценочной функции. При этом учитываются стоимость корректирующих мероприятий, ущерб от нарушения

ограничений и т.п. Значения $\|z_{is}\|$, записанные в какой-либо строке матрицы, представляют собой неоднозначную оценку соответствующего варианта решения. Если бы вероятности отдельных сочетаний информации были известны (вероятно-определенные условия), то для каждого варианта (строки матрицы) можно было бы найти математическое ожидание оценочной функции и достаточно уверенно выбрать вариант, наилучший «в среднем». Однако для условий неопределенности такая возможность отсутствует и оценки вариантов неизбежно получаются неоднозначными. В связи с этим для последующего анализа платежной матрицы можно определить и использовать лишь некоторые характерные оценки:

- а) максимальные для данного варианта затраты – наиболее пессимистическая оценка;
- б) минимальные затраты – наиболее оптимистическая оценка;
- в) среднеарифметические затраты – эта оценка имеет формальное сходство с математическим ожиданием затрат;
- г) максимальное значение риска, где риск R_{is} представляет собой перерасход, который будет иметь место при сочетании исходной информации y_{prs} в случае выбора варианта X_{pri} вместо локально-оптимального при данном сочетании.

При определении рисков R_{is} необходимо для каждого сочетания информации y_{prs} (каждого столбца платежной матрицы) определить минимальное значение затрат. Здесь минимум затрат рассчитывается не по строкам, а по столбцам. Определив все $I \times S$ значений R_{is} , можно получить матрицу рисков $\|R_{is}\|$, по виду аналогичную платежной матрице $\|z_{is}\|$. В каждом столбце матрицы рисков будет по крайней мере один элемент со значением $R_{is} = 0$.

Критериями выбора решений в условиях неопределенности являются: критерий Вальда, Лапласа, Севиджа и критерий Гурвица [5]. Ясно, что в условиях стохастической неопределенности выбор того или иного подхода к принятию решения или критерия оптимальности является субъективным. Поэтому может оказаться полезным проанализировать ситуацию с точки зрения нескольких критериев. Для этого можно сконструировать обобщенный критерий, в котором используются все характерные оценки вариантов.

В условиях неопределенности элемент субъективизма неизбежен и анализ проводится для выявления рациональных вариантов, а не для выбора одного «наилучшего» решения. Аналогичное положение с характерными оценками вариантов и критериями выбора будет и в условиях «частичной» неопределенности, когда проектировщик сети сталкивается не с полным отсутствием вероятностного описания вектора y_{pr} , а с неточностью (неоднозначностью) описания. В этом случае вместо платежной матрицы анализируется матрица математических ожиданий оценочной функции.

2.3 Оценка альтернативных вариантов проектного решения

Методы экспертных оценок. Альтернативы, с которыми приходится иметь дело при принятии проектных решений в САПР, как правило, представлены элементами множества исходных альтернатив, которые допускают упорядочение по некоторым аспектам [4, 5]. Для возможности обоснования принятия концептуального проектного решения важным является получение оценок (шкалирования) рассматриваемых альтернатив, при котором каждому

проектному решению ставится в соответствие совокупность чисел (вектор значений критериев качества проекта). Задачи оценивания чаще всего решаются экспертными методами. Унификация оценок экспертов достигается путем введения систем допустимых оценок.

В общем случае алгоритм экспертной процедуры может быть представлен следующим образом:

1 шаг – анализ исходной информации и построение множества возможных альтернатив для реализации сформулированной системы целей;

2 шаг – анализ признаков возможных альтернатив, выделение системы определяющих признаков и формирование комплекса аспектов для оценки альтернатив;

3 шаг – формирование множества допустимых оценок, организация и проведение экспертного опроса;

4 шаг – обработка результатов опроса экспертов; если результаты удовлетворяют проектировщика, то переход к шагу 5; если результаты не удовлетворяют, то возврат к шагу 3;

5 шаг – оформление результатов экспертной процедуры.

Здесь можно выделить метод Дельфи и его модификации, а также методы ранжирования альтернатив. Данные методы рассчитаны на групповой уровень оценки и практически не применимы при индивидуальном принятии решения.

Методы теории нечетких множеств. Подавляющая часть моделей принятия решений в нечетких условиях представляет собой формализацию этапа выбора, когда множество альтернатив, критериев целей, ограничения и отношения предпочтения считаются заданными. Проблема принятия концептуального проектного решения сводится к задаче многокритериального выбора. Описание многокритериальных задач удобно проводить с помощью построения отношений предпочтения между альтернативами с последующим выделением нечеткого множества недоминируемых альтернатив.

На ранних стадиях проектирования компьютерных сетей (этапы анализа технического задания и разработки технического предложения) имеется набор признаков, по которым производится экспертная оценка вариантов и выбирается в некотором смысле наилучший вариант. Поэтому в ходе анализа техническое задание целесообразно представлять в виде составной лингвистической переменной, смысл которой выражается с помощью набора эталонных функций принадлежности [5]. Исходные данные удобно сгруппировать в матрицу возможных проектных решений, где строки содержат описание альтернатив, а столбцы соответствуют признакам. Клетки матрицы заполняются функциями принадлежности, построенными на основе вербально-графических оценок экспертов. При сопоставлении оценок по признакам различной природы следует нормализовать шкалы признаков.

Метод анализа иерархий. Данный метод является систематической процедурой для иерархического представления элементов, определяющих суть любой проблемы [6], и в частности проблемы выбора базового варианта концептуального проектного решения в САПР. Решение проблемы, согласно данному методу, есть процесс поэтапного установления приоритетов. На первом этапе выделяются наиболее важные элементы проблемы, на втором – наилучший способ оценки элементов. Следующим этапом может быть оценка решения.

В основе метода анализа иерархий лежит принцип идентичности и декомпозиции, предусматривающий структурирование проблемы в виде иерархии [6]. В наиболее элементарном виде иерархия строится с вершины – цели (с точки зрения процесса проектирования), через промежуточные уровни – критерии (от которых зависят последующие уровни) к самому низкому, который является перечнем альтернативных проектных решений.

Пусть имеется набор альтернатив и набор критериев их оценки. Задача состоит в том, чтобы выбрать оптимальную альтернативу с учетом критериев оценки. В этом случае метод анализа иерархий можно разбить на 4 этапа:

1. Методом попарных сравнений необходимо оценить важность критериев. На данном этапе необходимо участие ЛПР. Используя некоторую шкалу градации качества, лицо, принимающее решение, должно сравнить все альтернативы и дать им оценку.

2. На втором этапе вычисляются веса критериев.

3. Фиксируя каждый из критериев, необходимо сравнить важность альтернатив по критериям, определить веса альтернатив и получить матрицу весов альтернатив.

4. Вычислить функции ценности для каждой альтернативы, по которым выбирается оптимальная.

Метод дает возможность провести декомпозицию и анализ проблемы оценивания альтернативных концептуальных решений в конкретной проектной ситуации и позволяет учитывать предпочтения проектировщика сети на множестве критериев. От проектировщика требуется только определить важность критериев путем их попарного сравнения. Данная процедура относится к классу нормально допустимых [5, 6]. Иерархическое представление системы принятия решений дает проектировщику наглядную и простую для понимания картину влияния изменения приоритетов на верхних уровнях на приоритеты элементов нижних уровней. Иерархии обладают свойством устойчивости и гибкости в том смысле, что расширение хорошо структурированной иерархии не разрушает ее характеристик. Следовательно, применение метода анализа иерархий целесообразно для выбора базового концептуального проектного решения в САПР корпоративных компьютерных сетей, т.к. наиболее соответствует принципам стратегии автоматизированного проектирования.

Таким образом, анализ существующих подходов к решению задачи выбора базового проектного решения в САПР корпоративных компьютерных сетей в условиях неопределенности показал целесообразность двухэтапного процесса принятия решения. На первом этапе на основе формальных методов определяется множество рациональных проектных решений; на втором – на базе экспертных процедур принимается базовое концептуальное проектное решение. При этом более эффективными являются методы анализа платежных матриц с выделением главного критерия и метод анализа иерархий.

Заключение

Следует отметить, что предложенные методы оптимизации и принятия проектных решений в САПР корпоративных компьютерных сетей достаточно хорошо автоматизируются, а с математической точки зрения данные методы легко реализуемы, и время работы программы определяется только продолжительностью начального диалога проектировщика с ЭВМ.

Список литературы

1. **Сафонова, И. Е.** Методы и модели оценки основных характеристик корпоративных функционально-ориентированных компьютерных сетей в САПР / И. Е. Сафонова. – М. : МИЭМ, 2007. – 346 с.
2. **Ларичев, О. И.** Теория и методы принятия решений / О. И. Ларичев. – М. : Логос, 2000. – 340 с.
3. **Сафонова, И. Е.** Многоцелевые задачи принятия проектных решений / И. Е. Сафонова, А. В. Вишнеков, В. И. Штейнберг. – М. : МИЭМ, 2002. – 108 с.
4. **Мушик, Э.** Методы принятия технических решений / Э. Мушик, П. Мюллер. – М. : Мир, 1990. – 237 с.
5. **Сафонова, И. Е.** Принятие проектных решений в системах автоматизированного проектирования корпоративных локальных вычислительных сетей / И. Е. Сафонова // Компьютеры в учебном процессе. – 2003. – № 12. – С. 80–93.
6. **Саати, Т. Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 450 с.

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВИВШИХСЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Предложена методика адаптивной идентификации позиционных систем автоматизированного управления по автоколебаниям технологических параметров. На примере объекта первого порядка произведены аналитический расчет и имитационное моделирование, показывающие эффективность методики.

Улучшение качества управления имеет большое значение для ряда отраслей промышленности. В качестве примеров можно привести магнийтермическое производство губчатого титана, процессы ректификации, плавки. Указанные и подобные им промышленные объекты отличаются от типовых тем, что их параметры эволюционируют во времени. По сути, большинство промышленных объектов в большей или меньшей степени являются нестационарными. В связи с этим возникают проблемы в управлении объектами такого рода. По мере изменения параметров настройки систем регулирования должны адекватно изменяться, следовательно, речь идет о синтезе адаптивных систем управления.

Основной задачей управления (рис. 1) является определение управляющего вектора $\vec{Y}'$, воздействие которого на объект ведет к достижению требуемого значения на выходе объекта:

$$\vec{Y}' : \vec{Y} \rightarrow \vec{Y}_0 \quad X_i \in [X_i^{\min}, X_i^{\max}], i = \overline{1, I}; \quad t < t_{\max}; \quad \|\vec{Y}_0 - \vec{Y}\| \leq \Delta Y_{\max},$$

где t – время регулирования; $t_{\max}$ – допустимое время переходного процесса; $\|\cdot\|$ – оператор вычисления динамической ошибки (рассогласования); $\Delta Y_{\max}$ – допустимое рассогласование; $\vec{Y}$ – вектор регулируемого параметра $\vec{Y} = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_j\}, j = \overline{1, J}$; $\vec{X}$ – вектор входных параметров $\vec{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}, i = \overline{1, I}$; $X_i^{\min, \max}$ – пределы изменения входных параметров; I – размерность вектора регулируемого параметра; J – размерность вектора заданного значения; $\vec{Y}_0$ – вектор заданного значения; $\vec{Y}'$ – вектор регулирующего воздействия.

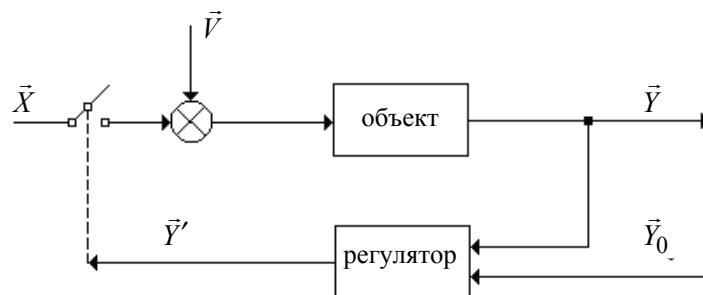


Рис. 1 Блок-схема замкнутой двухпозиционной системы управления объектом

Для исследования переходного процесса объекты управления рассматриваются как динамические $\vec{Y} = \vec{Y}(t)$ и описываются дифференциальными уравнениями вида

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} = f_i\left(\vec{X}, \vec{Y}_0, \vec{V}, \dots, \frac{\partial X_i}{\partial t}, \dots, \vec{A}\right), i = \overline{1, I},$$

где $\vec{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}, k = \overline{1, K}$ – вектор параметров объекта; $\vec{V}$ – вектор возмущающего воздействия.

Построение адекватных моделей нестационарных химико-технологических объектов, описывающих их динамику, связано с проблемой динамической идентификации объекта. Решение нельзя получить в общем виде, т.к. параметры химико-технологических объектов изменяются во времени по нелинейному закону.

Многие промышленные объекты управляются позиционными системами управления и работают в переходных режимах, которые характеризуются автоколебаниями сложной формы с переменными параметрами. На практике необходимо за счет улучшения качества управления (снижения амплитуд автоколебаний) обеспечивать эффективное функционирование технологических объектов в условиях изменения их динамических свойств и действия неконтролируемых возмущений [3]. Таким образом, одной из задач повышения качества позиционного управления является уменьшение амплитуды колебаний.

В основу разработки систем управления нестационарными объектами могут быть положены:

- использование традиционных методов исследования объектов с учетом эволюции: активный и пассивный эксперименты;
- создание универсального алгоритма идентификации с проверкой на имитационной модели и синтез динамики систем управления на его основе.

Исследования путем проведения активного эксперимента с подачей стандартного воздействия для получения переходной характеристики, по которой можно судить о динамических свойствах объекта, возможны обычно только на опытных и пилотных установках [1]. Для того чтобы избежать проблем, связанных с проведением эксперимента, предлагается методика построения модели динамики объекта на основании данных об автоколебаниях параметров в технологическом процессе.

В качестве примера рассмотрим химико-технологический объект, свойства которого изменяются во времени. Предположим, что в ходе технологического процесса вследствие фазовых переходов или химических превращений

меняется теплоемкость его материала $c \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$.

Пусть объект подвергается нагреву с заданной интенсивностью $\dot{Q}$ через поверхность с площадью F и отдает тепло вследствие конвективного теплообмена через противоположную поверхность (рис. 2). Объект характеризуется следующими параметрами: h – высота объекта, м; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности объекта, К; $T_{\text{нагр}}$ – температура нагревателя, К; $\dot{Q}$ – подводимый

тепловой поток $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$; $\dot{Q}_{\text{окр}}$ – тепловой поток в окружающую среду $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$; F – площадь поверхности объекта, м^2 ; k – коэффициент теплопередачи $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$.

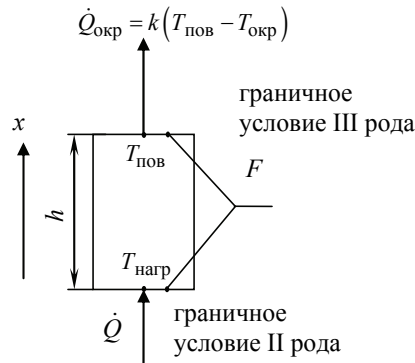


Рис. 2 Схема объекта управления

Построим математическую модель объекта управления (ОУ). В состоянии равновесия:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{окр}} = \dot{Q}_{\text{равн}}, \quad (1)$$

где $\dot{Q}_{\text{равн}}$ – равновесный тепловой поток.

По закону Фурье:

$$\dot{Q} = -\lambda \operatorname{grad} T \approx -\lambda \frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{нагр}}}{h},$$

где λ – коэффициент теплопроводности $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$.

Следовательно,

$$T_{\text{нагр}} \approx T_{\text{пов}} + \frac{\dot{Q}_{\text{равн}} h}{\lambda}. \quad (2)$$

Закон изменения $T(x)$ внутри объекта неизвестен. Предположив в первом приближении линейное изменение $T(x) \approx T_0 + T_1(x)$, $x \in [0, h]$, введем среднюю температуру:

$$T_{\text{сред}} \approx T_{\text{пов}} + \dot{Q}_{\text{равн}} \frac{h}{2\lambda}. \quad (3)$$

Такую же температуру имеет центр тела объекта. В неравновесном состоянии, когда $\dot{Q} \neq \dot{Q}_{\text{окр}}$, температура тела будет изменяться за счет изменения теплосодержания:

$$\Delta Q = Mc \Delta T_{\text{сред}}, \quad (4)$$

где ΔQ – количество теплоты, накопленное объектом; M – масса объекта; c – удельная теплоемкость.

С другой стороны, за время Δt теплосодержание за счет разности тепловых потоков изменится на

$$Q = (\dot{Q} - \dot{Q}_{\text{окр}}) \Delta t F; \quad (5)$$

$$\rho F h c d T_{\text{сред}} = \left(\dot{Q} - k (T_{\text{пов}} - T_{\text{окр}}) \right) F dt, \quad (6)$$

где ρ – плотность объекта $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$.

Разделим обе части уравнения (6) на F и, используя уравнение (3), выразим $T_{\text{пов}}$ через $T_{\text{сред}}$:

$$\rho h c d T_{\text{сред}} = \left[\dot{Q} - k \left(T_{\text{сред}} - \dot{Q} \frac{h}{2\lambda} - T_{\text{окр}} \right) \right] dt. \quad (7)$$

Далее обозначим $T_{\text{сред}} = T$ и преобразуем уравнение (7):

$$\begin{aligned} \rho h c d T &= \left(\dot{Q} - k T + \dot{Q} \frac{k h}{2\lambda} + k T_{\text{окр}} \right) dt; \\ \frac{\rho h c}{k} dT + T(t) dt &= \left(\frac{\lambda + \frac{k h}{2}}{k \lambda} \dot{Q}(t) + T_{\text{окр}}(t) \right) dt; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\rho h c}{k} \frac{dT}{dt} + T(t) = \frac{\lambda + \frac{k h}{2}}{k \lambda} \dot{Q}(t) + T_{\text{окр}}(t). \quad (9)$$

Выполним замену переменных в формуле (9):

$$T(t) = \bar{T} + \theta(t),$$

$$T_{\text{окр}}(t) = \bar{T}_{\text{окр}} + \Delta T_{\text{окр}},$$

$$\dot{Q}(t) = \bar{\dot{Q}} + \Delta \dot{Q}(t),$$

где $\bar{T}$, $\bar{T}_{\text{окр}}$, $\bar{\dot{Q}}$ – средние значения переменных T , $T_{\text{окр}}$, $\dot{Q}$.

Затем поместим начало координат в точку $(\bar{T}, \bar{T}_{\text{окр}}, \bar{\dot{Q}})$:

$$\frac{\rho h c}{k} \frac{d\theta}{dt} + \theta(t) = \frac{\lambda + \frac{k h}{2}}{k \lambda} \Delta \dot{Q}(t) + \Delta T_{\text{окр}}(t). \quad (10)$$

Обозначим $T_{\text{об}} = \frac{\rho h c}{k}$, $k_{\text{об}} = \frac{\lambda + \frac{k h}{2}}{k \lambda}$, где $T_{\text{об}}$ – постоянная времени объекта; $k_{\text{об}}$ – коэффициент передачи объекта.

Тогда уравнение (10) примет вид

$$T_{об} \frac{d\theta}{dt} + \theta(t) = k_{об} \Delta Q(t) + \Delta T_{окр}(t), \quad (11)$$

что соответствует передаточной функции апериодического звена первого по-

$$\text{рядка вида } W(p) = \frac{k_{об} \Delta Q + \Delta T_{окр}}{T_{об} p + \theta} = \frac{K}{T_{об} p + 1}.$$

С использованием программного пакета MATLAB (приложение Simulink [2, 5–7]), построена имитационная модель системы управления (рис. 4), которая включает в себя объект управления, регулятор и средства наблюдения (осциллограф).

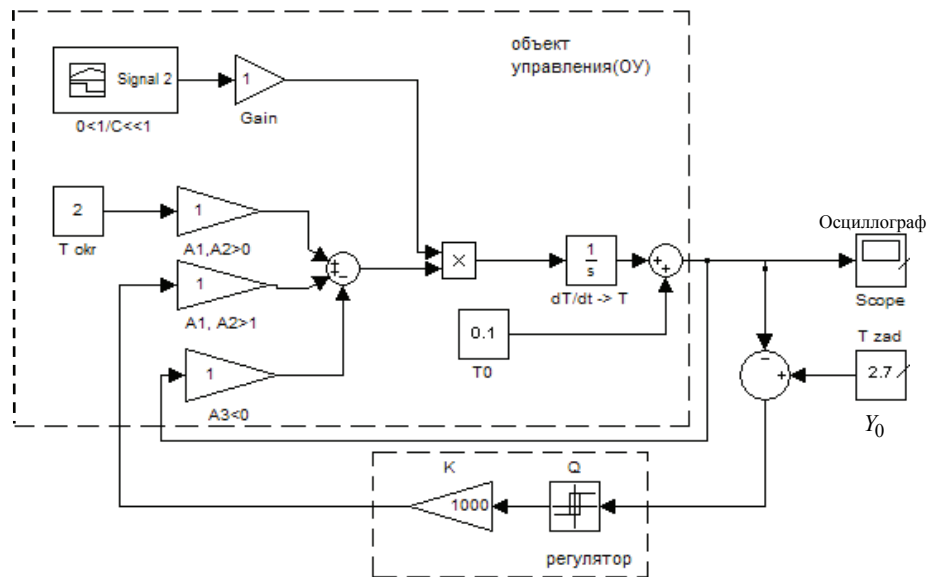


Рис. 4 Имитационная модель ОУ в среде Simulink

На основе этой имитационной модели проведен вычислительный эксперимент. Условиями проведения вычислительного эксперимента являются: настройки объекта – температура нагревателя $T_{нагр} = 2$ К, средняя температура объекта $T = 0,1$ К, заданное значение температуры $Y_0 = 2,7$ К; настройки регулятора – ресурс управления (тепловая мощность) $K = 1000$, допустимое отклонение от заданного значения $\Delta a = 0,5$.

В результате эксперимента получили переходный процесс, представленный на рис. 5, фазовый портрет системы (рис. 6), а также функцию зависимости $w(t)$, которая представлена на рис. 7, в сопоставлении с зависимостью $c(t)$.

Изменение формы автоколебаний температуры на отрезке времени от 0 до 14 с происходит с изменением периода автоколебаний примерно от 3 до 1,7 с. Соответствующий этим условиям фазовый портрет эволюции системы представлен на рис. 6.

График на рис. 7 удобен для определения частоты установившихся колебаний в замкнутой системе при изменении свойств объекта.

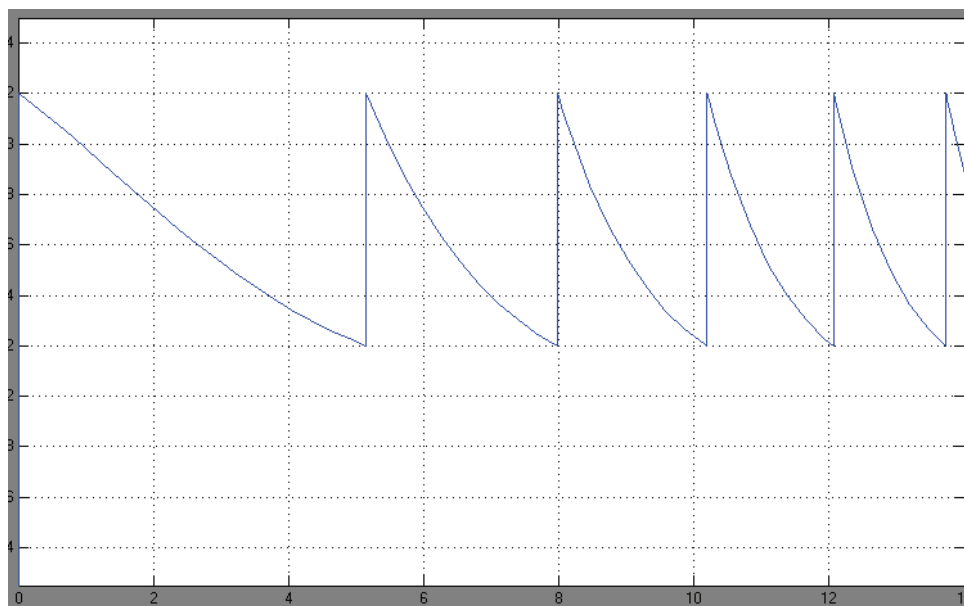


Рис. 5 Тренд автоколебаний температуры

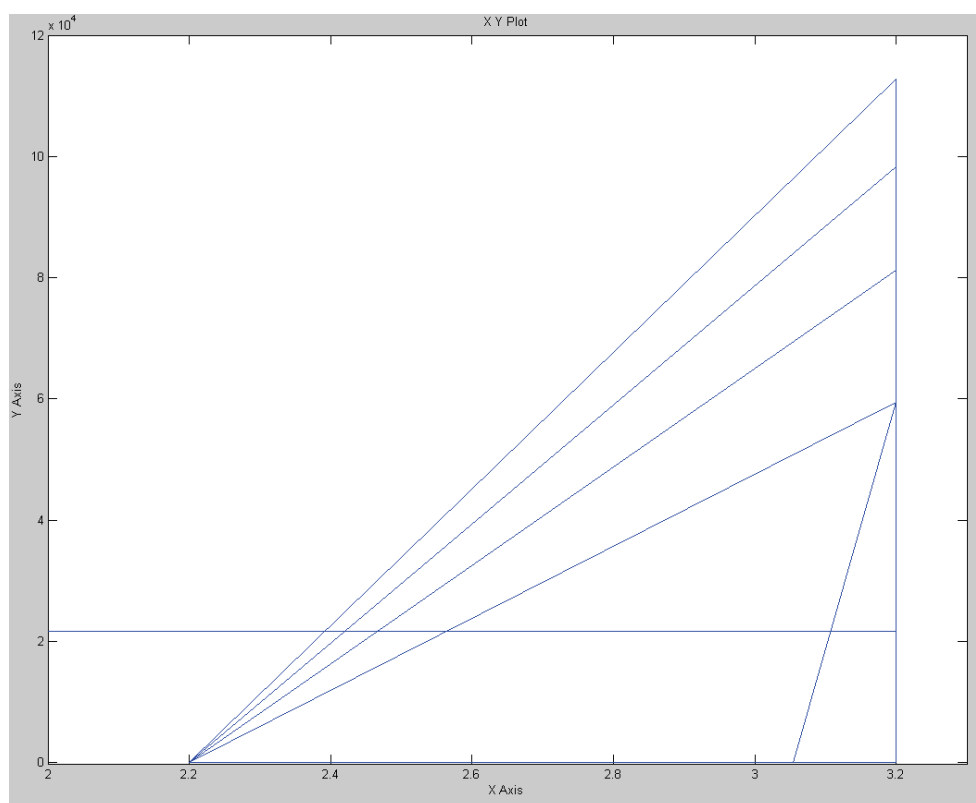


Рис. 6 Фазовый портрет эволюции системы управления

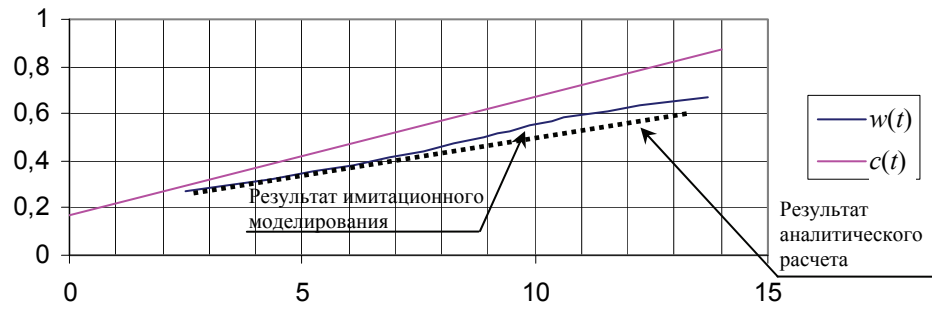


Рис. 7 График зависимости теплоемкости c и частоты w от времени t

В работе [4] для простых объектов получена зависимость периода автоколебаний от параметров объекта:

$$T_k(t) = 2 T_{об} \ln \frac{K\dot{Q} + a}{K\dot{Q} - a} = 2 \frac{\rho h c(t)}{k} \ln \frac{K\dot{Q} + \Delta a}{K\dot{Q} - \Delta a}. \quad (12)$$

Задавшись линейным изменением теплоемкости во времени технологического процесса $c(t) = \alpha t + \beta$ при прочих неизменных параметрах объекта, получим формулу для частоты автоколебаний:

$$w(t) = \frac{1}{T_k(t)} = \frac{K^*}{\alpha t + \beta},$$

где $K^* = \text{const}$ – комбинация остальных переменных из формулы (12).

Так как в реальных объектах $\alpha \ll 1$, эта зависимость будет иметь почти линейный вид, совпадающий с представленным на рис. 6. Анализ переходного процесса данного объекта показывает, что поддерживаемая двухпозиционным регулятором амплитуда автоколебаний температуры остается неизменной, а частота в зависимости от теплоемкости объекта меняется на протяжении заданного временного интервала. Следовательно, для рассмотренного объекта имитационная модель адекватна аналитической. Это позволяет предполагать, что адаптацию как по результатам имитационного моделирования, так и по параметрам трендов реальных химико-технологических объектов можно использовать для настройки систем регулирования.

Это подтверждает нестационарность рассмотренного объекта управления. Полученная модель может использоваться для идентификации объекта, например для определения постоянной времени T . По другим параметрам автоколебаний можно идентифицировать и другие параметры объекта.

Предложенный подход к исследованию системы с нестационарным ОУ позволяет:

- в наглядной форме отображать внутренние изменения свойств объекта;
- определять параметры автоколебаний в системе;
- изменением настроечных параметров регулятора ($K, \Delta a$) приводить параметры автоколебаний к желаемым значениям.

Список литературы

1. Беккер, В. Ф. Моделирование химико-технологических объектов управления / В. Ф. Беккер. – Пермь : Перм. гос. техн. ун-т, 2005. – 102 с.

2. **Беккер, В. Ф.** Исследование элементов систем управления с применением пакета MATLAB / В. Ф. Беккер. – Пермь : Перм. гос. техн. ун-т, 2007. – 253 с.
3. **Затонский, А. В.** Позиционное управление в сложных системах / А. В. Затонский, Ю. П. Кирин, В. Ф. Беккер. – Березники : Березниковский филиал Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 150 с.
4. **Клюев, А. С.** Автоматическое регулирование / А. С. Клюев. – М. : Энергия, 1973. – 392 с.
5. **Половко, А. М.** Matlab для студента / А. М. Половко, П. Н. Бутусов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 320 с.
6. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/>.
7. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.asucontrol.ru/>.

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА СТРАТЕГИЧЕСКОГО УРОВНЯ УПРАВЛЕНИЯ УНИВЕРСИТЕТОМ

Решена задача структурирования функции качества в процессах диагностики системы менеджмента качества стратегического уровня управления университетом. Разработана процессная система диагностики системы менеджмента качества (стратегический уровень). Приведен пример оценки устойчивости системы диагностики системы менеджмента качества университета, выявлена корреляция процессов диагностики.

Введение

Управление университетом традиционно осуществляется на трех уровнях: общеуниверситетском (стратегическом); факультетском (тактическом) и кафедральном (оперативном).

В обобщенном виде система менеджмента качества (СМК) университета вместе со структурированием функции качества в ее процессах представлена в табл. 1.

Таблица 1

Процессы СМК университета

Код процесса	Название процесса	Пункты ГОСТ Р ИСО 9001–2001
1	2	3
Процессы управленческой деятельности		
У-01	Формирование политики и целей	5.1–5.5 (кроме 5.5.2), 6.1
У-02	Управление СМК	4.1, 5.5.2, 8.1
У-03	Анализ со стороны руководства	5.6
У-04	Управление образовательным процессом	7.1, в, 7.5.1, а–д
Процессы жизненного цикла предоставления образовательных услуг университета		
ОУ-01	Маркетинг образовательных услуг	7.2
ОУ-02	Довузовская подготовка	7.4.1, 7.4.2
ОУ-03	Прием и зачисление в университет	7.4.3
ОУ-04	Проектирование образовательных программ	7.1 (кроме в), 7.3
ОУ-05	Реализация основных образовательных программ	7.5.3–7.5.5, 8.2.4, 8.3
ОУ-06	Аттестация выпускника	7.5.2
ОУ-07	Трудоустройство и послевузовское обслуживание	7.5.1, е
Процессы обеспечения ресурсами		
Р-01	Управление персоналом	6.2
Р-02	Поддержание и развитие инфраструктуры	6.3
Р-03	Поддержание и развитие производственной среды	6.4
Р-04	Управление информационными ресурсами	4.2
Р-05	Управление финансовыми ресурсами	–

Окончание табл. 1

1	2	3
Процессы мониторинга и улучшения		
М-01	Мониторинг удовлетворенности стейкхолдеров	8.2.1
М-02	Внутренние аудиты	8.2.2
М-03	Мониторинг процессов СМК	8.2.3
М-04	Анализ данных	8.4
М-04	Улучшения	8.5

Диагностика СМК как научная дисциплина находится в стадии формирования, и в настоящее время нет общепринятого определения диагностики СМК. Поэтому будем основываться на определениях диагностики, используемых в технике и медицине:

а) по аналогии с технической диагностикой: установление и исследование признаков, характеризующих состояние СМК, для устранения несоответствий в ее функционировании и прогнозирования потенциальных несоответствий с целью их предотвращения;

б) по аналогии с медицинской диагностикой: совокупность методов и принципов распознавания состояния СМК, в том числе и областей ее совершенствования.

Система диагностики СМК – подсистема СМК, основное назначение которой состоит в распознавании состояния СМК, выявление несоответствий в ее функционировании и областей возможного совершенствования.

Структурирование функции качества в процессах диагностики СМК

Для разработки процессной модели системы диагностики СМК стратегического уровня управления университетом осуществлено структурирование функции качества в рамках обеспечения диагностики СМК. Результат структурирования показан на рис. 1.

Процессная модель системы диагностики СМК университета

С позиций процессного подхода в самом обобщенном виде диагностику СМК можно представить как мегапроцесс.

Мегапроцесс – процесс, для которого характерна максимальная степень обобщения функции качества. То есть применительно к данному аспекту менеджмента качества не существует функции качества более высокого уровня, и структурирование функции качества осуществляется на более низких уровнях.

Такой подход к пониманию диагностики СМК позволяет применить к управлению диагностикой методы статистического управления процессами.

Вход мегапроцесса имеет сложную структуру, которую можно описать как совокупность входов процессов, образующих мегапроцесс. Аналогично, выход мегапроцесса описывается как совокупность выходов, входящих в мегапроцесс процессов.

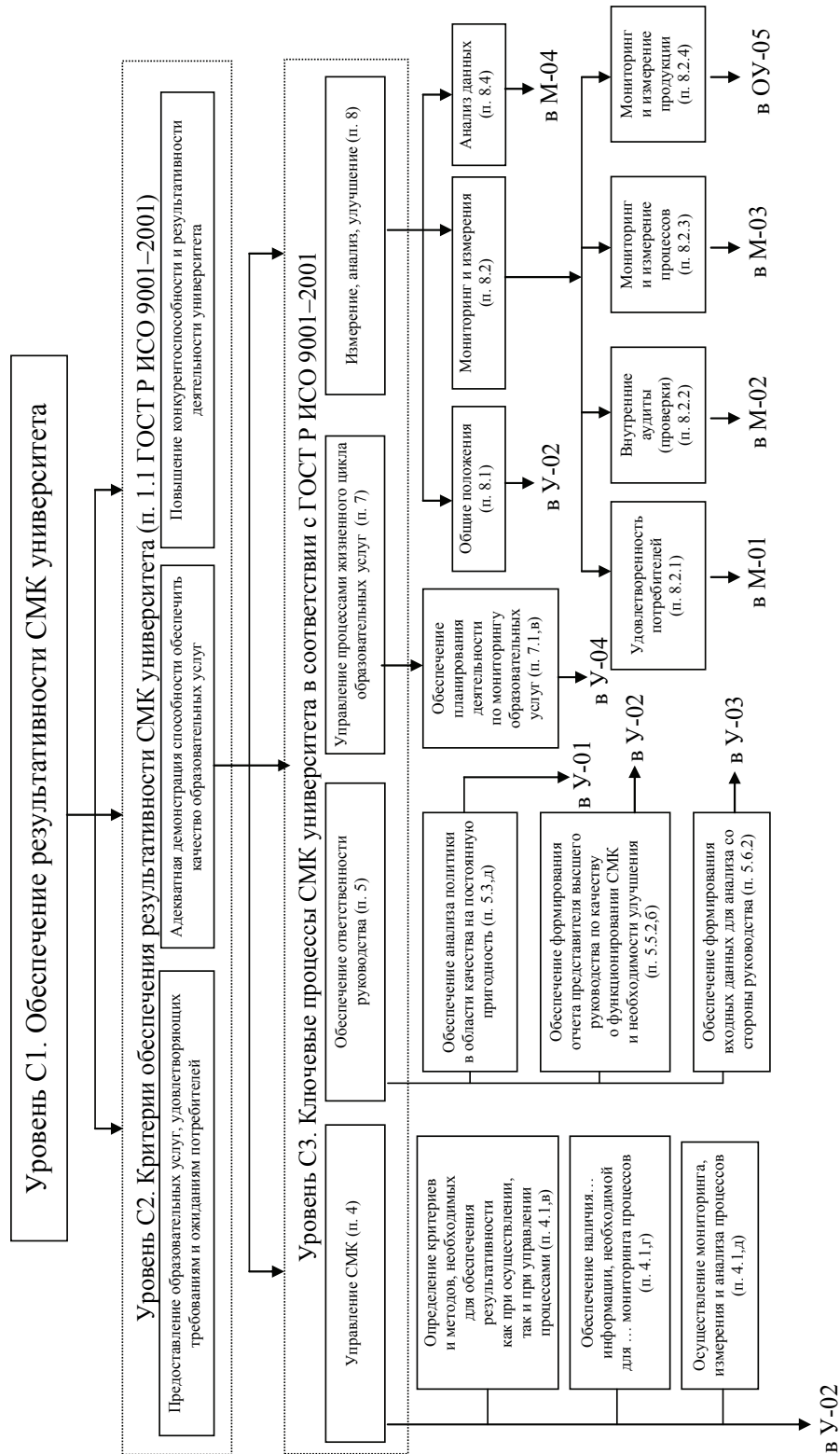


Рис. 1 Структурирование функции качества в процессах диагностики SMK (стратегический уровень)

Проведем детализацию и построим модель системы диагностики СМК как модель мегапроцесса «Диагностика СМК» с учетом выводов, полученных выше при структурировании функции качества в процессах диагностики СМК.

Отдельно выделим такие популярные в настоящее время процедуры диагностики СМК, как самооценка эффективности функционирования системы управления университетом в области менеджмента качества на основе модели совершенства и SWOT-анализа состояния образовательных услуг университета.

Процессная модель системы диагностики СМК университета приведена на рис. 2. Здесь показан стратегический уровень управления университетом. На тактическом уровне структурирование функции качества реализуется несколько иначе, что будет исследовано в последующих публикациях авторов. Входы системы диагностики привязаны к процессам и процедурам. Выходы в первую очередь привязаны к процессу М-05 «Улучшения» с целью реализации корректирующих и предупреждающих действий.

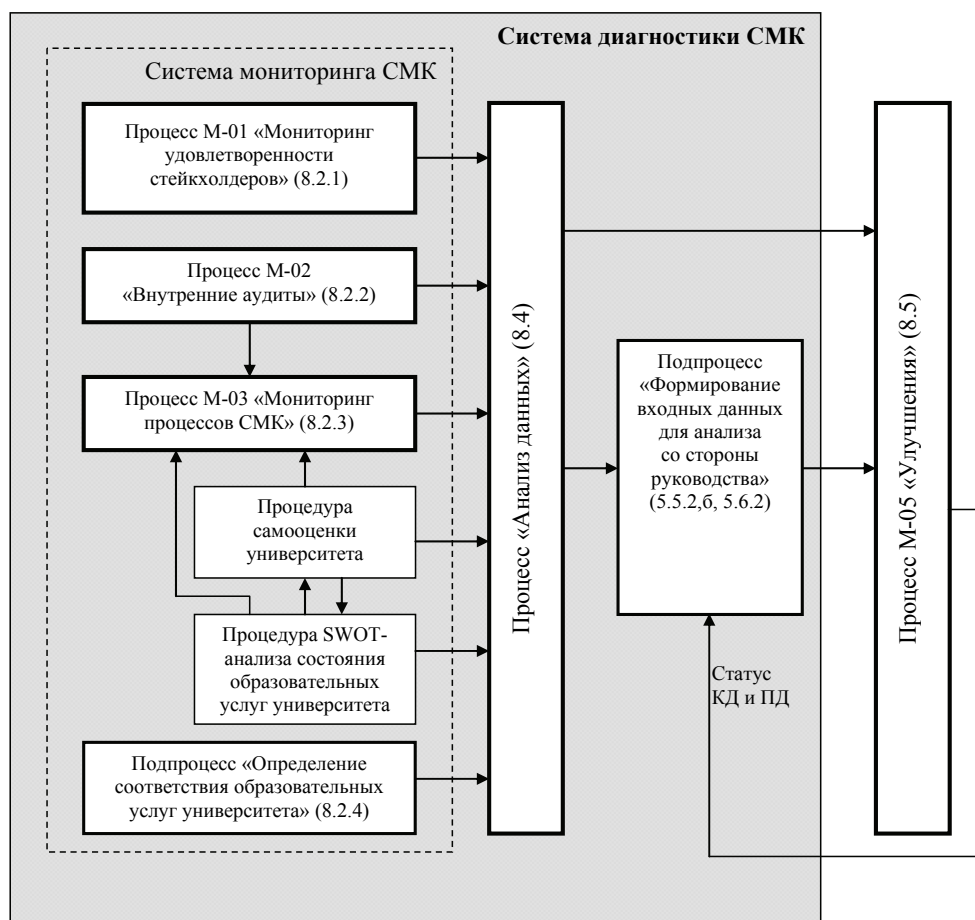


Рис. 2 Система диагностики СМК университета (стратегический уровень управления)

Пример системы диагностики СМК

В качестве примера рассмотрим реальные интегральные показатели процессов диагностики СМК Пензенского государственного университета.

СМК сертифицирована на соответствие ГОСТ Р ИСО 9001–2001. Интегральные показатели представляют собой линейную свертку оценки адекватности процесса и экспертных оценок уровня совершенства в конкретной области. Значения показателей приведены в табл. 2. Появление в табл. 2 процесса У-02 обусловлено п. 4.1, в–г ГОСТ Р ИСО 9001–2001. Периодичность измерений соотнесена с продолжительностью цикла предоставления образовательных услуг высшего профессионального образования.

Таблица 2
Интегральные показатели процессов диагностики СМК

Процесс	Интегральный показатель процесса					
	Обозначение	Значения интегрального показателя, %				
		Май 2005	Июнь 2007	Декабрь 2007	Июнь 2007	Декабрь 2007
У-02 «Управление СМК»	$I_{У-02}$	35	39	50,3	56,3	55
У-03 «Анализ со стороны руководства»	$I_{У-03}$	41	47	50,4	56,5	54
М-01 «Мониторинг удовлетворенности стейкхолдеров»	$I_{М-01}$	41	55	52,1	51	55,5
М-02 «Внутренние аудиты»	$I_{М-02}$	50	65	56,6	64	54
М-03 «Мониторинг процессов СМК»	$I_{М-03}$	38	62	43,5	54,5	62
М-04 «Анализ данных»	$I_{М-04}$	41	53,6	59,1	56,5	54
Среднее значение, $\bar{x}_i, i = 1...5$		41	53,6	52	56,5	55,8
Размах $R_i, i = 1...5$		15	26	15,6	13	8

Выясним, управляем ли мегапроцесс «Диагностика СМК» с помощью контрольных карт средних значений и размахов [1]. Контрольные карты являются мощными инструментами мониторинга процессов и позволяют определить существование неслучайных вариаций.

Параметры контрольных карт средних значений и размахов:

1) центральная линия контрольной карты средних значений соответствует значению

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i,$$

где $m = 5$ – число моментов наблюдения;

2) нижняя контрольная граница контрольной карты средних значений:

$$НКГ_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R},$$

где коэффициент $A_2 = 0,483$ [1], $\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i$ – средний размах (ему соответствует центральная линия на карте размахов);

3) нижняя граница контрольной карты размахов равна нулю (размах должен быть как можно меньше);

4) верхняя контрольная граница контрольной карты средних значений:

$$ВКГ_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R};$$

5) верхняя граница контрольной карты размахов:

$$ВКГ_R = D_4 \bar{R},$$

где коэффициент $D_4 = 2,004$ [1].

На рис. 3, 4 приведены контрольные карты средних значений и размахов, соответствующие мегапроцессу «Диагностика СМК». Как видно из рис. 3, с июня 2006 г. система диагностики СМК находится в управляемом состоянии (СМК сертифицирована в октябре 2006 г.). Управление мегапроцессом «Диагностика СМК» обеспечило стабильное уменьшение размаха значений интегральных показателей процессов (рис. 4).

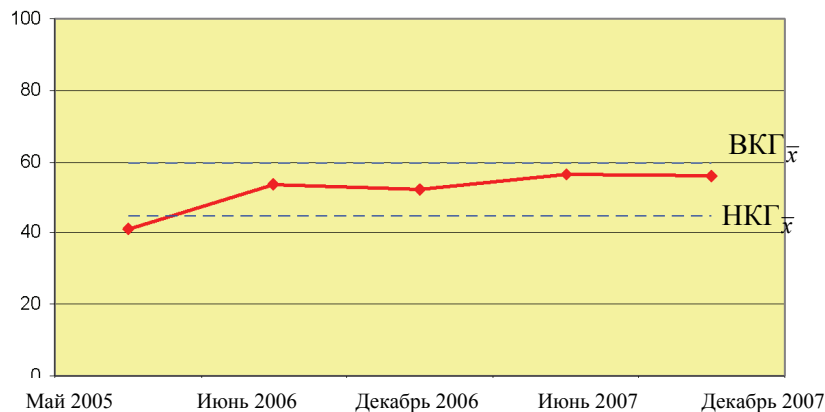


Рис. 3 Контрольная карта средних значений

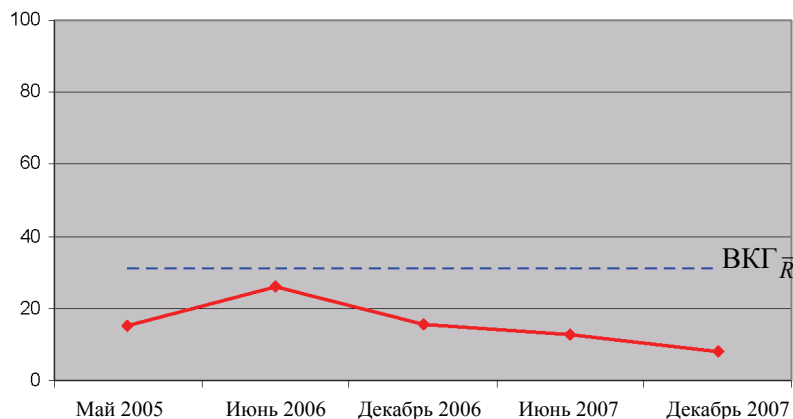


Рис. 4 Контрольная карта размахов

Оценим мощность мегапроцесса (*process capability*). Она характеризует способность процесса удовлетворять потребности [1]. Для этого оценим вероятность:

$$P\left(\frac{НКГ_{\bar{x}} - \bar{\bar{x}}}{\frac{\bar{R}}{d_2}} < Z < \frac{ВКГ_{\bar{x}} - \bar{\bar{x}}}{\frac{\bar{R}}{d_2}}\right) = P(-2,2 < Z < 2,2) = 0,013...0,99.$$

При таком интервале необходимо рассчитать потенциал мегапроцесса:

$$C_p = \frac{ВКГ_{\bar{x}} - НКГ_{\bar{x}}}{6 \frac{\bar{R}}{d_2}} = 0,41 < 1 -$$

потенциал мегапроцесса невысок.

Для повышения потенциала мегапроцесса необходимо совершенствование его составляющих. Обеспечение принятия решений в отношении совершенствования мегапроцесса «Диагностика СМК» построим на принципе Парето, согласно которому 80 % возможных методов совершенствования системы диагностики СМК нужно применить к 20 % ее составляющих. В модели системы шесть процессов, 20 % от шести составляют 1,2, т.е. надо определить два процесса диагностики максимально коррелированных с другими процессами.

Корреляция процессов диагностики СМК стратегического уровня

Корреляционный анализ позволит оценить степень взаимосвязи между процессами диагностики, если она существует.

В табл. 3 представлена матрица парных коэффициентов корреляции (корреляционная матрица) для системы диагностики показателей, которые приведены в табл. 2 (коэффициенты корреляции подсчитаны в *Microsoft Excel*).

Таблица 3

Корреляционная матрица

	I_{Y-02}	I_{Y-03}	I_{M-01}	I_{M-02}	I_{M-03}	I_{M-04}
I_{Y-02}	1	0,97	0,57	0,24	0,39	0,75
I_{Y-03}	0,97	1	0,68	0,47	0,56	0,8
I_{M-01}	0,57	0,68	1	0,58	0,84	0,82
I_{M-02}	0,24	0,47	0,58	1	0,60	0,60
I_{M-03}	0,39	0,56	0,84	0,60	1	0,46
I_{M-04}	0,75	0,8	0,82	0,60	0,46	1

Для анализа корреляции процессов диагностики используем табл. 4 [2].

Таблица 4

Градации корреляции

Значение	Интерпретация
До 0,2	Очень слабая корреляция
От 0,2 до 0,5	Слабая корреляция
От 0,5 до 0,7	Средняя корреляция
От 0,7 до 0,9	Высокая корреляция
Свыше 0,9	Очень высокая корреляция

Анализ матрицы парных коэффициентов корреляции показывает:

- 1) между процессами диагностики СМК наблюдается положительная (прямая) связь – все коэффициенты положительные;
- 2) очень высокая корреляция наблюдается для процессов Y-02 и Y-03 (коэффициент парной корреляции равен 0,97);

3) высокая корреляция (коэффициент парной корреляции больше 0,7, но меньше 0,9) наблюдается для процессов У-02 и М-04; У-03 и М-04; М-01 и М-03; М-01 и М-04;

4) средняя корреляция (коэффициент парной корреляции больше 0,5, но меньше 0,7) наблюдается для процессов У-02 и М-01; У-03 и М-01; У-03 и М-03; М-01 и М-02; М-02 и М-03; М-02 и М-04;

5) слабо коррелированы процессы У-02 и М-02; У-02 и М-03; У-03 и М-02; М-03 и М-04;

6) очень слабой корреляции не наблюдается.

На рис. 5 показана визуализация корреляции процессов диагностики СМК. Здесь ОВ – очень высокая корреляция; В – высокая корреляция; С – средняя корреляция.

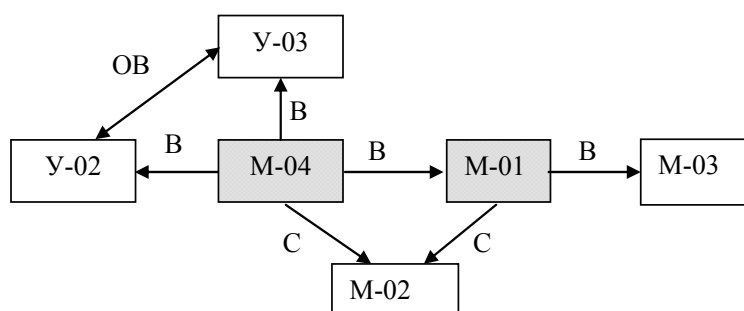


Рис. 5 Степень корреляции процессов диагностики СМК стратегического уровня

Как видно из рис. 6, совершенствовать целесообразно процессы М-04 и М-01. Уточним, что именно дает совершенствование данных процессов с целью увеличения значений I_{M-04} и I_{M-01} . С помощью пакета *SPSS* найдены уравнения регрессии, связывающие интегральный показатель каждого процесса с аналогичными показателями всех остальных процессов (табл. 5).

Таблица 5

Уравнения регрессии

Процесс	Уравнение регрессии
У-02 «Управление СМК»	$I_{Y-02} = -16,8 + 1,7I_{Y-03} - 0,4I_{M-02} - 0,1I_{M-03} + 0,1I_{M-04}$
У-03 «Анализ со стороны руководства»	$I_{Y-03} = 10,1 + 0,6I_{Y-02} + 0,2I_{M-02} + 0,1I_{M-03} - 0,1I_{M-04}$
М-01 «Мониторинг удовлетворенности стейкхолдеров»	$I_{M-01} = 16,6 - 0,2I_{Y-02} - 0,3I_{M-02} + 0,4I_{M-03} + 0,7I_{M-04}$
М-02 «Внутренние аудиты»	$I_{M-02} = 52,8 + 0,7I_{Y-02} - 3,2I_{M-01} + 1,3I_{M-03} + 2,5I_{M-04}$
М-03 «Мониторинг процессов СМК»	$I_{M-03} = -40,8 + 0,5I_{Y-02} + 2,5I_{M-01} + 0,7I_{M-02} - 1,9I_{M-04}$
М-04 «Анализ данных»	$I_{M-04} = -21,3 + 0,3I_{Y-02} + 1,3I_{M-01} + 0,4I_{M-02} - 0,5I_{M-03}$

Отрицательные множители при интегральных показателях в уравнениях регрессии указывают на конкуренцию целей процессов за ресурсы, которая может быть устранена посредством совершенствования процессов.

Совершенствование процессов М-04 и М-01 способствует улучшению не только этих процессов, но и процессов М-02 и М-03. В системе диагностики СМК задействованы не все процедуры процессов У-02 и У-03, поэтому целесообразно искать иные пути их совершенствования, выходящие за рамки задач диагностики СМК.

Заключение

Таким образом, структурирование функции качества в процессах диагностики СМК университета позволило разработать процессную модель системы диагностики. При этом использована концепция мегапроцесса. Система диагностики сертифицированной СМК, построенная на базе ряда ее процессов, является устойчивой. Между процессами диагностики СМК стратегического уровня наблюдается корреляционная связь. Использование принципа Парето позволило выявить процессы диагностики СМК, совершенствование которых может способствовать улучшению функционирования системы диагностики СМК университета в целом.

Список литературы

1. **Левин, Д. М.** Статистика для менеджеров с использованием *Microsoft Excel* : пер. с англ. / Д. М. Левин, Д. Стефан, Т. С. Кребвиль, М. Л. Беренсон. – 4-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1312 с.
2. **Френкель, А. А.** Корреляционный и регрессионный анализ в экономических приложениях : учебное пособие / А. А. Френкель, Е. В. Адамова. – М. : МЕСИ, 1987. – 224 с.

Н. В. Слепцов, С. В. Щербакова

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭВОЛЮЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ РАЗДЕЛЕНИЯ ОЦЕНКИ И МАСШТАБИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы эффективной реализации генетических вычислений, предлагаются методы улучшения качества популяций с помощью средств управления видообразованием множества исходных решений с учетом параметров решаемой задачи.

Методы эволюционных вычислений и эволюционной информатики становятся в последние годы востребованным инструментом в приложениях, где требуется проведение существенных объемов вычислений при недостаточно строгой формулировке конечной цели и(или) границ процесса вычислений либо при невозможности получения в полном объеме данных требуемой точности [1, 2].

Основные черты эволюционных вычислений рассмотрим применительно к их реализации в форме генетических алгоритмов (ГА), представляющих собой поисковые алгоритмы, основанные на использовании механизмов натуральной селекции и генетики [3, 4]. Они реализуют принцип «выживания наиболее приспособленных» среди анализируемых структур, формируя и изменяя поисковый алгоритм на основе моделирования эволюции поиска. В очередной генерации особей новое множество искусственных носителей информации о параметрах решаемой проблемы создается путем использования части старых и добавления новых частей со свойствами, являющимися по каким-то параметрам предпочтительными. Базисным отличием ГА от алгоритмов случайного поиска является эффективное использование информации, накопленной в процессе эволюции.

Первоначальная популяция ГА формируется, как правило, случайным образом, но при этом она должна содержать ряд приемлемых решений. Чтобы оценить качество закодированных решений, или *пригодность*, используют *функцию приспособленности*, или *пригодности*. По результатам оценки особей наиболее приспособленные из них отбираются путем *селекции* для скрещивания, в результате которого посредством применения генетического оператора *кроссовера* создаются *потомки*, генетический код которых формируется в результате обмена хромосомной информацией между родительскими особями. Эти потомки формируют новую популяцию, причем часть потомков *мутирует* (генетический оператор *мутации*), что выражается в случайном изменении их генотипов. Этап, включающий последовательность операций оценки популяции, селекции, скрещивания и мутации, носит название *поколения*. Эволюция популяции образована из последовательности поколений.

Отличие в реализации других видов эволюционных вычислений от приведенной схемы ГА состоит в деталях реализации, например, в способах кодирования параметров задачи (вещественное, целочисленное), наборе и роли генетических операторов, особенностях их реализации, количестве подпопуляций, критериях и принципах эволюции.

Одной из основных задач, стоящих при реализации ГА, является получение популяций с максимально соответствующим решаемой задаче набором

параметров, поскольку дальнейшие шаги сводятся к отбору из имеющегося множества решений оптимальных. Предметом настоящего рассмотрения будут методы, обеспечивающие решение этой проблемы.

Разделение оценки пригодности – это метод видообразования для популяции ГА, позволяющий найти множество решений. Он преобразует пространство поиска путем уменьшения выигрыша в хорошо исследованных районах пространства поиска.

Суть метода в следующем. Пусть имеется особь i с оценкой f_i . Счетчик m_i показывает, сколько в популяции имеется особей, с которыми i разделяет значение оценки. Разделенная оценка пригодности f_i^s определяется в виде

$$f_i^s = \frac{f_i}{m_i}, \quad (1)$$

где m_i вычисляется с помощью метрики расстояния d_{ij} , которое определяет различие между особями i и j . Принципиально такое различие может быть измерено любым подходящим способом. Отметим, что такое измерение часто представляет нетривиальную задачу, например, измерение различия между двумя нейронными сетями различной архитектуры. В качестве меры различия воспользуемся расстоянием Хемминга [5] между двоичными строками:

$$m_i = \sum_{j=1}^n \text{sh}(d_{ij}), \quad (2)$$

где n – размер популяции, а функция $\text{sh}(d_{ij})$, изменяющая расстояние между особями, разделяющими оценку, определяется в виде

$$\text{sh}(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{ij}}{\sigma_s} \right)^\alpha, & \text{при } 0 \leq d_{ij} < \sigma_s, \\ 0, & \text{при } d_{ij} \geq \sigma_s. \end{cases}$$

Параметр α изменяет вид функции разделения: $\alpha = 1$, соответствует линейной функции; σ_s – радиус разделения (две строки, расположенные на расстоянии σ_s или больше, не разделяют оценку).

Применение разделяемой оценки имеет ограничения:

- σ_s одинакова для всех особей, поэтому точки оптимума в пространстве поиска должны быть приблизительно равноудаленными;
- установление σ_s требует априорных сведений об удаленности оптимумов и значений оценки в этих точках;
- чтобы поддержать ослабленную оценку вершин i, j , на σ_s накладывается ограничение [6]:

$$\sigma_s \leq \frac{d_{i,j}}{1 - \min\left(\frac{f_i}{f_j}, \frac{f_j}{f_i}\right)}.$$

Такие ограничения могут привести к тому, что при разделении оценки будут найдены не все оптимумы, если они неравноудаленны.

Рассмотрим работу метода для мультимодальной оптимизации на примере простой задачи поиска. Пространство поиска образовано полным набором двоичных строк длиной 30 битов. Из $2^{30} \approx 10^9$ строк, глобальными оптимумами являются только 10, они перечислены в табл. 1. Неразделенный выигрыш равен 1,0 для точного попадания в оптимум и уменьшается линейно до 0 при совпадении в 2/3, при котором из 30 битов любые 10 будут неверными, т.е.

$$f = \begin{cases} 3q - 2, 1 \geq q > \frac{2}{3}, \\ 0, q \leq \frac{2}{3}, \end{cases} \quad (3)$$

где q – показатель совпадения, $0 \leq q \leq 1$.

Расстояние Хемминга между глобальными оптимумами составляет 10 битов или больше. Если особь популяции объединяет в себе более одного оптимума, т.е. содержит перекрывающуюся строку с 10 и более битами для более чем одного оптимума, она получает выигрыш, соответствующий приближению к наиболее близкому оптимуму. Такие строки составляют менее 0,15 от числа всех возможных строк с ненулевым выигрышем. Никакие оптимумы из табл. 1 не разделяют строительный блок больше, чем на два бита.

Таблица 1

Глобальные оптимумы

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Размер популяции и другие параметры моделирования. Выбор размера популяции обеспечивает решение двух проблем. Первая – случайно сгенерированное первое поколение должно иметь особей в каждой из областей, в которых присутствуют решения. При этом 10 и более неверных битов из 30 дают нулевой выигрыш. Для каждого оптимума число соседних строк с вы-

игрышем (на расстоянии до 9 битов) равно $\sum_{i=0}^9 C_{30}^i = 22964087$. Ряд строк на-

ходится в перекрывающихся областях между пиками. Так как пространство содержит $2^{30} \approx 10^9$ строк, можно выполнить полный поиск и определить, что только 200 296 086 строк получают ненулевой выигрыш. Распределяя их на 10 пиков, видим, что каждый из них имеет в окрестности приблизительно $2 \cdot 10^7$ строк с ненулевым выигрышем.

Для полного пространства в 2^{30} строк это оставляет порядка 98 % пространства вне окрестности данного пика. Используя бином Ньютона, получим, что вероятность пропуска данного пика случайной популяцией размера n составит $0,98^n$. Ожидаемое среднее число пиков, представленных в случайной начальной популяции, составляет $10 \cdot (1 - 0,98^n)$. Так, популяция в 200 особей даст значение этого показателя, близкое к 10:

$$A = 10 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{2 \cdot 10^7}{2^{30}} \right) \right] \approx 9,77.$$

Эту величину следует увеличить, поскольку вследствие применяемой ранжированной селекции потребуется несколько поколений для того, чтобы исчезли особи с нулевым выигрышем (рис. 1).

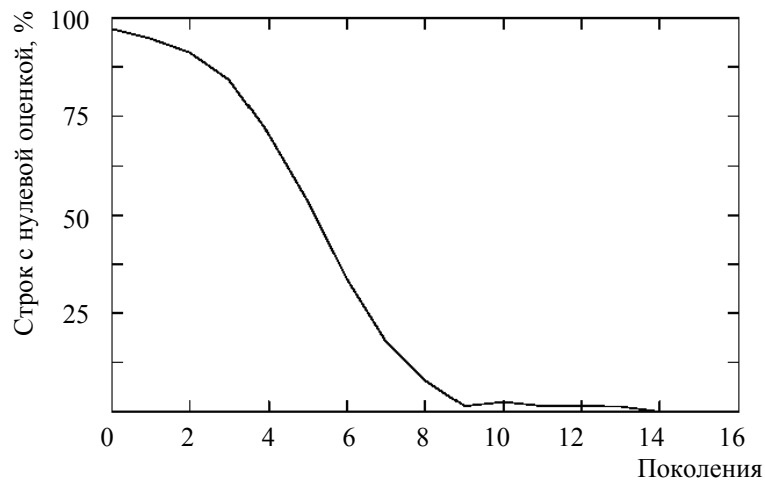


Рис. 1 Эволюция популяций с нулевой оценкой

Далее, размер популяции должен быть достаточным для образования субпопуляций в окрестностях каждого оптимума. Эта величина зависит от типа используемого кроссовера: случайного, при котором предки выбирают-ся произвольно, или выборочного, при котором предки выбираются с близкими чертами. Очевидно, что для данной частной проблемы выборочный кроссовер даст лучшие результаты. Воспользуемся для оценки размера популяции данными из [7]:

$$n = \frac{\ln \left(1 - \gamma^{\frac{1}{G}} \right)}{\ln \left(\frac{c-1}{c} \right)},$$

где c — число субпопуляций с одинаковой оценкой; G — количество поколений; γ — значение вероятности.

Отсюда при $c = 10$ для $G = 100$ и $\gamma = 0,999$ требуемый размер популяции $n = 131$, следовательно, $n = 200$ является достаточным для формирования субпопуляций.

Другие характеристики ГА, используемые при моделировании, состоят в следующем:

- применяется стратегия элитизма – особь с наивысшими характеристиками всегда копируется в последующее поколение без изменения;
- уровень мутации выбирается равным 0,006;
- для предотвращения доминирования наилучших особей применяется линейное ранжирование: лучшие особи образуют по два потомка, худшие – ни одного.

Параметры кроссовера. Выборочный кроссовер по определению усиливает видообразование в популяциях ГА. Особенно сильно эти свойства проявляются при разделении оценки пригодности: он способствует фиксации потомков вблизи точек оптимума.

В нашем случае под термином «выборочный» будем понимать кроссовер между особями, близкими по свойствам, но еще не пересекавшимися.

Рассмотрим два различных пространства поиска. Первое имеет точки оптимумов, приведенные в табл. 1. Вершины (пики) пространства не содержат общих строительных блоков длиной больше 2 битов. Поэтому маловероятно, что гибриды обеспечат эффективный поиск вершин. Концептуальная диаграмма первого пространства приведена на рис. 2.

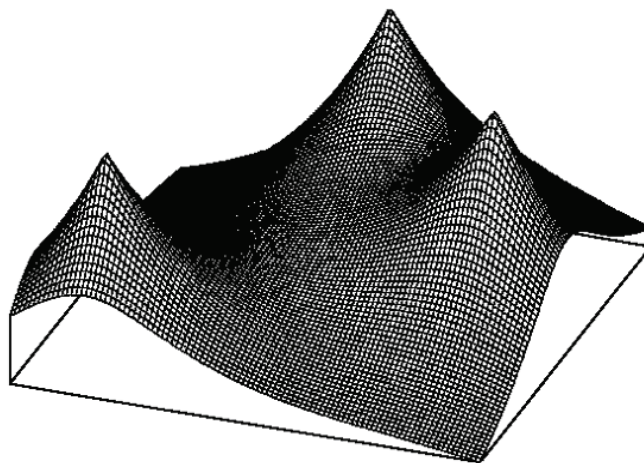


Рис. 2 Диаграмма пространства поиска (табл. 1).
Вершины не разделяют строительные блоки

Второе пространство подобно первому за исключением того, что его вершины разделяют стандартные блоки (табл. 2). Оценка выигрыша, так же, как и для первого пространства, изменяется линейно (рис. 3). В этом случае пространство поиска содержит 10 оптимумов, разделяющих строительные блоки. Для четырех комбинаций из двух методов кроссовера и двух пространств поиска проводилось по 30 прогонов модели, размер популяции составлял 20 особей, масштабирующий фактор был равен 2. Результаты приведены в табл. 3

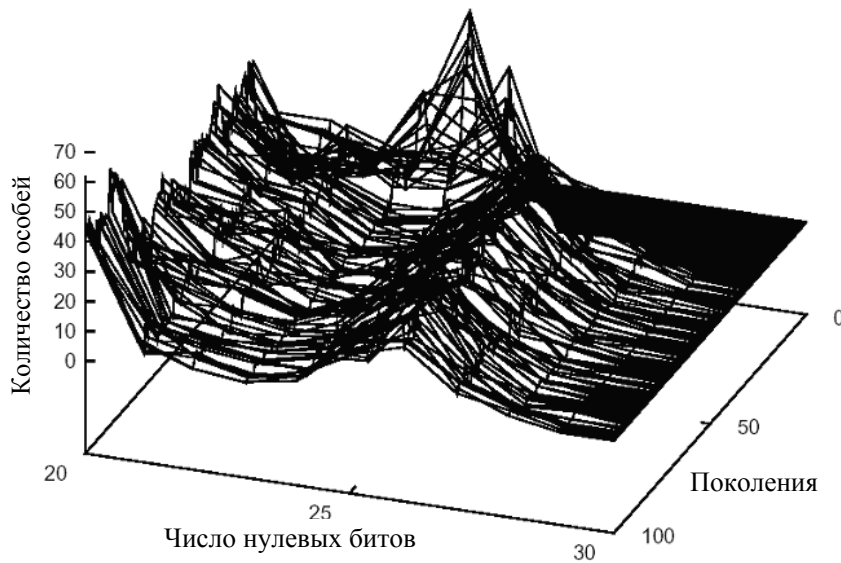


Рис. 4 Распределение популяций (масштабирование отсутствует)

Причина такого явления в следующем. Разделяемый выигрыш зависит от ближайших соседей, неразделяемый выигрыш составляет 1 для точного попадания и уменьшается линейно до 0 для 10 неверных битов. Радиус деления σ_s также составляет 10 битов. Особь в точке оптимума разделяет выигрыш с каждой особью в окружающей области. Но особь на краю области разделяет свою меньшую неразделенную выплату с гораздо меньшим количеством соседей, что поднимает ее разделенный выигрыш.

Продemonстрируем это вычислением разделенного выигрыша вокруг изолированной вершины для типичного распределения популяции. Любое реалистическое распределение будет нулевым вне области выигрыша. Внутри примем однородное распределение, т.е. все особи равновероятны. Любое другое распределение с большим количеством особей на краю области выигрыша поощрило бы особей в центре.

Для такого распределения вычислим значение m_i и найдем разделяемую оценку (1) для особи на расстоянии Хемминга в k битов от вершины.

На рис. 5 показан разделяемый выигрыш для приведенного распределения популяции. Самый высокий выигрыш находится не в оптимуме, а на некотором расстоянии от него. Это объясняет рис. 4. Субпопуляция остается вблизи оптимума, но не в нем, поскольку особь в оптимуме должна разделить выигрыш с максимальным количеством соседей, что резко уменьшает выигрыш.

Чтобы побудить субпопуляции сходиться к оптимуму, вместо того, чтобы остаться вокруг него, можно применить масштабирующие функции, в качестве которых обычно берутся степенные функции вида

$$f_i^s = \frac{(f)^{\beta}_i}{m_i}. \quad (4)$$

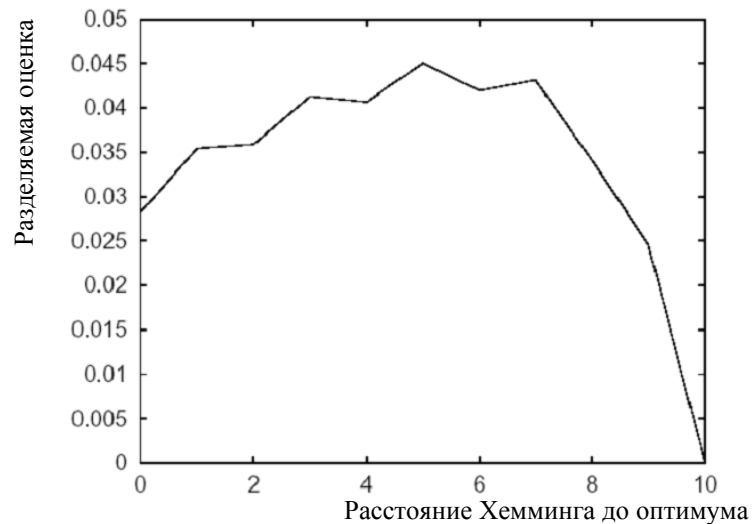


Рис. 5 Разделяемая оценка

Оптимальная масштабирующая функция. Оптимальная форма масштабирующей функции зависит от атрибутов критерия оптимальности, который определяет, какая масштабирующая функция дает лучший результат (рис. 6). В нашем случае критерий оптимальности – нахождение максимально возможного числа оптимумов (табл. 1).

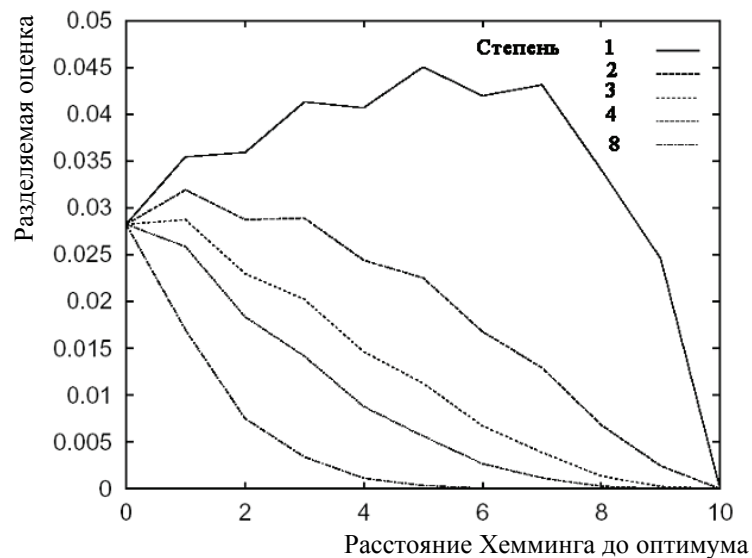


Рис. 6 Разделяемая оценка для различных функций

Определение 1. Семейство функций Φ является множеством функций $\{C\phi(z)\}$, где $\phi(z)$ – масштабирующая функция; C – положительное вещественное число; z – немасштабированная оценка пригодности. $\Phi + \alpha$ обозначает множество функций $\{C\phi(z + \alpha)\}$, $\alpha\Phi$ обозначает множество функций $\{C\phi(\alpha z)\}$.

Следующие два определения описывают возможные атрибуты критерия оптимальности, от которых зависит форма наиболее эффективной масштабирующей функции.

Определение 2. Критерий оптимальности является инвариантным к единицам измерения, если для каждого двух семейств масштабирующих функций Φ_1 и Φ_2 и для любого постоянного α верно следующее:

1) если Φ_1 лучше, чем Φ_2 в смысле этого критерия, то $\alpha\Phi_1$ также лучше $\alpha\Phi_2$;

2) если Φ_1 эквивалентно Φ_2 в смысле этого критерия, то $\alpha\Phi_1$ – также эквивалентно $\alpha\Phi_2$.

Критерий оптимальности – нахождение максимально возможного числа вершин, является в этом смысле инвариантным. Если мы в пространстве поиска изменим разметку оси, например z , и сделаем диапазон разметки вместо $0 - 1$, $0 - 1000000$, две различные масштабирующие функции дадут одинаковый относительный результат. Пусть Φ_1 имеет масштабирующую функцию $\phi(z) = z^2$, а для Φ_2 масштабирующей функцией является $\phi(z) = z$. При изменении единиц измерения характеристики пространства поиска остаются прежними. Две масштабирующие функции будут находиться в том же самом относительном соотношении, и Φ_1 будет в обоих случаях лучше соответствовать критерию нахождения максимального числа вершин (рис. 7).

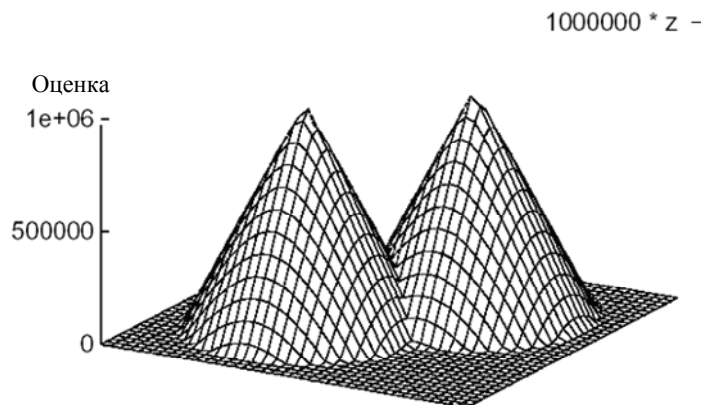


Рис. 7 Инвариантность критерия относительно единиц измерения

Определение 3. Критерий оптимальности является инвариантным к сдвигу, если для каждого двух семейств масштабирующих функций Φ_1 и Φ_2 вычисления функций и для любого постоянного α верно следующее:

1) если Φ_1 лучше, чем Φ_2 в смысле этого критерия, то $\Phi_1 + \alpha$ также лучше $\Phi_2 + \alpha$;

2) если Φ_1 эквивалентно Φ_2 в смысле этого критерия, то $\Phi_1 + \alpha$ – также эквивалентно $\Phi_2 + \alpha$.

Наш критерий оптимальности не является инвариантным по отношению к сдвигу. Пусть мы имеем те же семейства масштабирующих функций

$\Phi_1(\phi(z) = z^2)$ и $\Phi_2(\phi(z) = z)$. Сдвиг пространства поиска вверх на ту же величину (1000000) резко меняет характер пространства поиска (рис. 1 и 8).

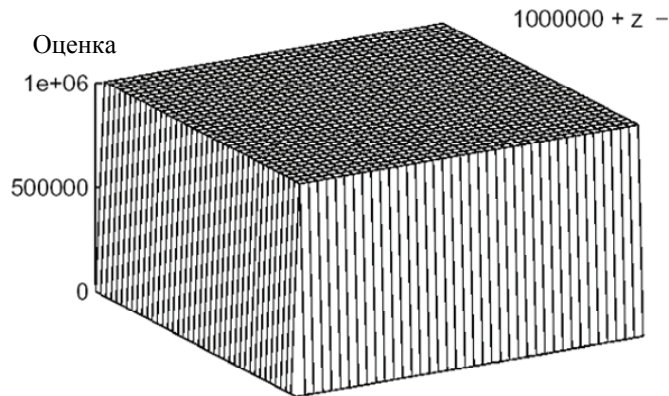


Рис. 8 Неинвариантность критерия к сдвигу

Такое «затопление» пространства поиска приведет к потере преимущества Φ_1 перед Φ_2 . В таких условиях различие, которое дает единичная функция и квадратичная масштабирующая функция, является несущественным для ГА. Возвращаясь к определению 3, Φ_1 лучше Φ_2 в смысле нашего критерия, а $\Phi_1 + \alpha$ эквивалентно $\Phi_2 + \alpha$, т.е. определение не выполняется, и критерий не является инвариантным по отношению к сдвигу.

Проблемы использования степенных функций. Для первой области поиска (табл. 1) рис. 9 показывает результаты типичного прогона для масштабирующей функции с показателем $\beta = 10$. В отличие от рис. 4, на рис. 9 каждая субпопуляция гладко сходится к оптимуму. Функция масштабирования решила проблему субпопуляций, которые располагались около оптимума вместо того, чтобы достигать его.

Однако возникает новая проблема – высокая степень, равная 10, заставляет субпопуляции сходиться к оптимумам, но при этом оказывается найденной лишь часть вершин, большинство оказалось просто пропущено. Та же картина наблюдается и при $\beta = 8$ (рис. 10).

Причина состоит в следующем. В соответствии с соотношением (2) начальная популяция заполняет окрестности каждой вершины. Однако особи, расположенные ближе к вершинам, получают непропорциональное преимущество, размножаются намного более активно и способствуют исчезновению из популяции особей, расположенных на большем удалении от вершин. Соответственно, последние области полностью теряют особи.

Высокое значение показателя степени у масштабирующей функции позволяет обходить разделение оценок, не усиливая при этом поиск в неисследованных областях. Применение пропорциональной селекции вместо линейной ранжированной приводит к появлению у рекордных особей более чем двух потомков, что дополнительно ухудшает результаты.

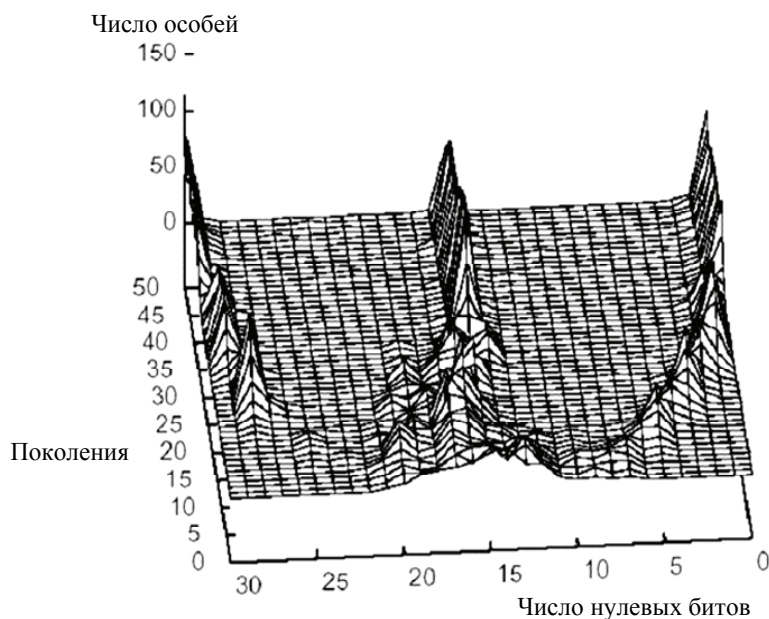


Рис. 9 Распределение популяций (масштабирующая степень 10)

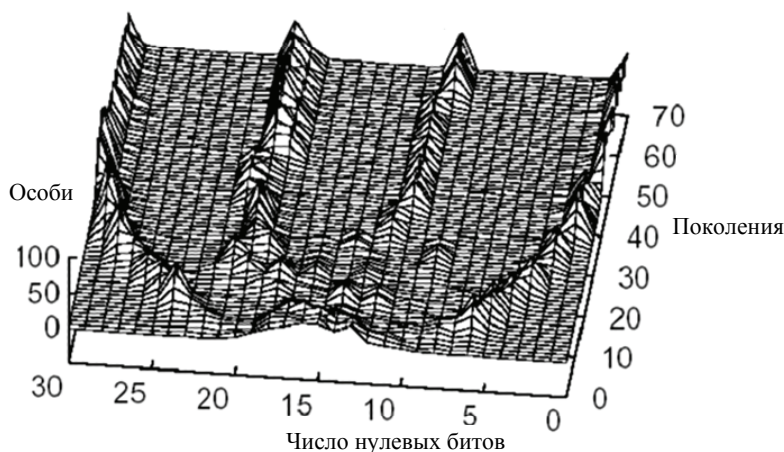


Рис. 10 Распределение популяций (масштабирующая степень 8)

Уменьшение показателя степени приводит к увеличению числа найденных вершин до отметки 8 вместо 9,77, как следует из (2).

Следовательно, мы находимся в противоречивой ситуации:

- высокая степень масштабирования обеспечивает особям, находящимся на минимальном расстоянии от вершин, намного большие преимущества, чем более удаленным особям, обрекая последние на вымирание, однако при этом число найденных вершин уменьшается;

- низкая степень способствует фиксации особей на некотором расстоянии от вершин, поскольку в этом случае особи разделяют преимущества с меньшим числом соседей.

Популяция в 200 особей должна обеспечить нахождение всех вершин, однако в наилучшей ситуации мы находим только 8 вершин вместо 10 (9,77).

Поскольку наилучшей одномерной масштабирующей функцией для задачи является степенная [9], то очевидно, что пригодной одномерной масштабирующей функции не существует. Выбор же многомерной масштабирующей функции – трудная задача сама по себе, что ставит вопрос о поиске более эффективных методов улучшения сходимости ГА.

Анализ метода разделения оценки пригодности с масштабированием. Знание проблемы часто предлагает и ее решение. Фактически для алгоритмов поиска желательно уравновесить приоритеты расширения области изменчивости особей на некотором удалении от вершин и ее резкого сужения в непосредственной близости от нее. Фиксированная масштабирующая функция вносит дисбаланс в эти приоритеты, поэтому простейшим принципиальным решением было бы введение динамической масштабирующей функции, меняющейся на разных фазах выполнения ГА. Низкие величины степени в начале функционирования ГА расширят область поиска, а повышенные значения при дальнейшем выполнении обеспечат схождение субпопуляций к значениям оптимумов. На рис. 11 масштабирующая функция меняется от 1 для первых 50 поколений до 10 к 200 поколению с шагом 0,06 в диапазоне поколений от 50 до 200.

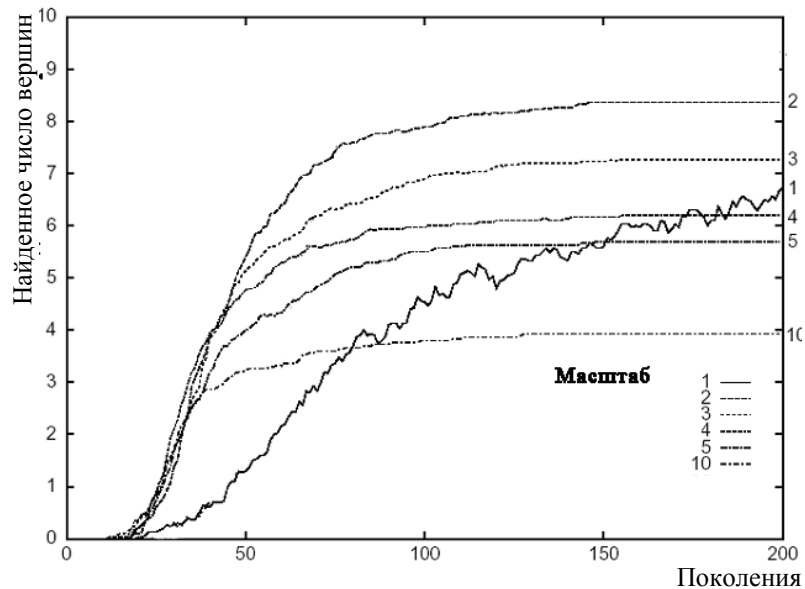


Рис. 11 Найденное число вершин для разных показателей масштабирования

Предлагаемая процедура не учитывает состояние популяции. Можно предложить, например, связать изменение функции со степенью разделения субпопуляций, можно воспользоваться методиками детерминированного уплотнения [8] и т.д. Такие методы не требуют априорного знания показателя удаленности вершин и не накладывают ограничения равноудаленности.

Однако более обещающей идеей является воспроизведение процесса так называемого культурного развития как третьей степени адаптации после индивидуального обучения особей и эволюции популяции, который накапливает информацию, не ограничиваясь временем существования особи, но протекает быстрее, чем эволюция.

Список литературы

1. **Букатова, И. Л.** Эвоинформатика: теория и практика эволюционного моделирования / И. Л. Букатова, Ю.И. Михасев, А. М. Шаров. – М. : Наука, 1991. – 207 с.
2. **Редько, В. Г.** Эволюционная кибернетика / В. Г. Редько. – М. : Наука, 2001. – 224 с.
3. **Емельянов, В. В.** Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФМЛ, 2003. – 428 с.
4. **Курейчик, В. М.** Эволюционные алгоритмы: генетическое программирование. Обзор / В. М. Курейчик, С. И. Родзин // Известия РАН. ТиСУ. – 2002. – № 1. – С. 127–137.
5. **Осипов, П. М.** Математические модели генетических алгоритмов / П. М. Осипов, Н. В. Слепцов, В. А. Трусков [и др.] // Надежность и качество –2007 : труды международного симпозиума. – Пенза, 2007. – С. 231–234.
6. **Eiben, A. E.** Theory of Evolutionary Algorithms: A Bird's Eye View / A. E. Eiben, G. Rudolph // Theoretical Computer Science. – 1999. – V. 229. – № 1. – P. 3–9.
7. Chambers Practical handbook of genetic algorithms // Complex coding systems. – 2001. – V. 3. – 659 p.
8. **Holland, J. H.** Building Blocks, Cohort Genetic Algorithms, and Hyperplane-Defined Functions / J. H. Holland // Evolutionary Computation. – 2000. – № 4(8). – P. 373–391.
9. **Koza, J.** Genetic programming: a paradigm for genetically breeding computer population of computer programs to solve problems / J. Koza. – Cambridge, MA: MIT Press, 1992.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 537.874.6

Г. С. Макеева, О. А. Голованов, М. В. Савченкова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Разработана математическая модель распространения электромагнитных волн в гиромагнитных наноструктурированных средах на основе декомпозиционного подхода с применением автономных блоков (АБ) с магнитными нановключениями и каналами Флоке. Получено характеристическое уравнение для определения постоянных распространения волн в трехмерной периодической решетке, включающее матрицу рассеяния (дескриптор) АБ.

Рассчитаны постоянные распространения правополяризованной и левополяризованной волн (при продольном подмагничивании) и обыкновенной и необыкновенной волн (при поперечном подмагничивании), и комплексные значения эффективных электромагнитных параметров магнитного наноматериала.

Введение

Магнитные нанокомпозиты, состоящие из решеток наноразмерных ферромагнитных металлических частиц в немагнитной твердой диэлектрической матрице, являются новым решением в создании микроволновых материалов с низкими потерями. Актуальной является задача построения адекватных математических моделей распространения и дифракции электромагнитных волн в периодических магнитных нанорешетках, базирующихся на решении уравнений Максвелла совместно с уравнением Ландау-Лифшица.

1 Математическая модель

На рис. 1 показана модель наноструктурированной гиромагнитной среды на основе решетки магнитных наночастиц (ферромагнитных наносфер радиуса r), находящихся в немагнитной матрице – диэлектрической среде с относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями ϵ_v, μ_v .

Волновой процесс в периодической наноструктуре (рис. 1) можно рассматривать как суперпозицию бесконечного числа плоских неоднородных волн (пространственных гармоник) [1]:

$$\vec{E}_0(\perp, z_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \vec{E}_n(\perp) \exp(-i\Gamma_n z_0), \quad \vec{H}_0(\perp, z_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \vec{H}_n(\perp) \exp(-i\Gamma_n z_0) \quad (1)$$

с постоянными распространения

$$\Gamma_n = v + \frac{2\pi n}{\Lambda}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \infty, \quad (2)$$

где Λ – длина ячейки вдоль направления $\vec{z}_0$; символ $\perp$ означает совокупность поперечных координат.

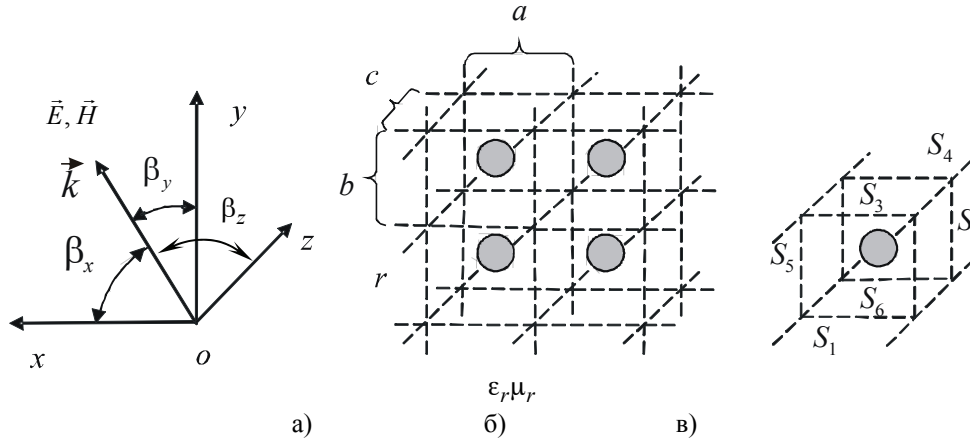


Рис. 1 Модель наноструктурированной гиромагнитной среды на основе решетки магнитных наночастиц: а – направление распространения волнового процесса $\vec{z}_0$; б – трехмерная периодическая решетка ферромагнитных наносфер; в – моделирование ячейки частично заполненным магнетиком автономным блоком с каналами Флоке

Постоянная распространения $\Gamma_0 = v$ волны основного типа ($n = 0$) является неизвестной величиной и подлежит определению.

Электромагнитное поле $\vec{E}_0, \vec{H}_0$ волны, распространяющейся в трехмерной периодической наноструктуре (рис. 1,б) согласно теореме Флоке [1] может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} \vec{E}_0(x+a, y, z) &= \vec{E}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_x), \quad \vec{H}_0(x+a, y, z) = \vec{H}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_x), \\ \vec{E}_0(x, y+b, z) &= \vec{E}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_y), \quad \vec{H}_0(x, y+b, z) = \vec{H}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_y), \\ \vec{E}_0(x, y, z+c) &= \vec{E}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_z), \quad \vec{H}_0(x, y, z+c) = \vec{H}_0(x, y, z) \exp(-i\varphi_z), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varphi_x = \Gamma_n a \cos \beta_x$, $\varphi_y = \Gamma_n b \cos \beta_y$, $\varphi_z = \Gamma_n c \cos \beta_z$; $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ – углы ориентации направления распространения волнового процесса.

Выделим в трехмерной периодической наноструктуре элементарную ячейку (рис. 1,б) с геометрическими размерами a, b, c , содержащую ферромагнитную наносферу радиуса r , и представим ее модель в виде автономных блоков (АБ) с магнитными нановключениями и виртуальными каналами Флоке (рис. 1,в). Тогда вследствие периодичности наноструктуры согласно теореме Флоке на входных сечениях АБ (рис. 1,в) должны выполняться соотношения (4) для амплитудных коэффициентов падающих $c_{n(\beta)}^+(\omega_m)$ и отраженных $c_{k(\alpha)}^-(\omega_m)$ волн ($\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$; $k, n = 1, 2, \dots$; $m = \pm 1, \pm 2, \dots$) в каналах Флоке:

$$\begin{aligned}
 c_{n(4)}^+(\omega_m) &= c_{n(1)}^+(\omega_m) \exp(-i\varphi_x), \quad c_{n(5)}^+(\omega_m) = c_{n(2)}^+(\omega_m) \exp(-i\varphi_y), \\
 c_{n(6)}^+(\omega_m) &= c_{n(3)}^+(\omega_m) \exp(-i\varphi_z), \quad c_{k(4)}^-(\omega_m) = c_{k(1)}^-(\omega_m) \exp(-i\varphi_x), \\
 c_{k(5)}^-(\omega_m) &= c_{k(2)}^-(\omega_m) \exp(-i\varphi_y), \quad c_{k(6)}^-(\omega_m) = c_{k(3)}^-(\omega_m) \exp(-i\varphi_z), \quad (4) \\
 k, n &= 1, 2, \dots; \quad m = \pm 1, \pm 2, \dots,
 \end{aligned}$$

Подставим (4) в соотношение

$$\mathbf{c}^- = \mathbf{R} \cdot \mathbf{c}^+, \quad (5)$$

где $\mathbf{R}$ – матрица рассеяния (дескриптор) АБ с магнитными нановключениями и виртуальными каналами Флоке,

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{\alpha\alpha} & \mathbf{R}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{R}_{\beta\alpha} & \mathbf{R}_{\beta\beta} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

здесь α – совокупность входных сечений АБ S_1, S_2, S_3 ; β – совокупность входных сечений АБ S_4, S_5, S_6 ; векторы $\mathbf{c}^-$ и $\mathbf{c}^+$ составлены соответственно из $c_{n(\beta)}^+(\omega_m)$ и $c_{k(\alpha)}^-(\omega_m)$.

В результате получим характеристическое уравнение для определения постоянных распространения Γ_n волн в трехмерной периодической нанорешетке:

$$\Delta(\Gamma_n) = \left| \mathbf{R}_{\alpha\alpha} - \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{\beta\alpha} + \mathbf{R}_{\alpha\beta} \cdot \mathbf{H} - \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{R}_{\beta\beta} \cdot \mathbf{H} \right| = 0, \quad (7)$$

где $\Delta(\Gamma_n)$ – определитель матрицы; $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{h}_x & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{h}_y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{h}_z \end{pmatrix}$ – диагональная матрица

с элементами, определяемыми как

$$h_{x(lj)} = -i\delta_{lj}\Gamma_n a \cos\beta_x, \quad h_{y(lj)} = -i\delta_{lj}\Gamma_n b \cos\beta_y, \quad h_{z(lj)} = -i\delta_{lj}\Gamma_n c \cos\beta_z.$$

В характеристическое уравнение входят клетки $\mathbf{R}_{\alpha\alpha}, \mathbf{R}_{\beta\alpha}, \mathbf{R}_{\alpha\beta}, \mathbf{R}_{\beta\beta}$ матрицы рассеяния $\mathbf{R}$ АБ с магнитными нановключениями и виртуальными каналами Флоке. Дескриптор АБ (матрица рассеяния АБ в линейном приближении) определяется в результате решения нелинейной краевой задачи дифракции (стационарных нелинейных уравнений электродинамики с условием неасимптотического излучения на гранях АБ) проекционным методом Галеркина [2]. На основе полученного характеристического уравнения (7) возможен электродинамический анализ постоянных распространения волн в трехмерной периодической решетке различной геометрии из нелинейных магнитных наноэлементов произвольной формы (сфер, эллипсов, цилиндров, прямоугольников и т.д.) с использованием алгоритма для определения матрицы рассеяния $\mathbf{R}$ АБ с магнитными нановключениями и виртуальными каналами Флоке. Расчет матрицы рассеяния $\mathbf{R}$ производится в результате совместного решения краевой

задачи дифракции для уравнений Максвелла и уравнения Ландау-Лифшица, в котором учитывается поле обменного взаимодействия.

2 Электродинамический расчет эффективных электромагнитных параметров гиромангнитной наноструктурированной среды

С использованием характеристического уравнения (7) и алгоритма расчета матрицы рассеяния **R** АБ с магнитными нановключениями и виртуальными каналами Флоке [2] проведен электродинамический расчет постоянных распространения электромагнитных волн $\Gamma_0 = \nu$, распространяющихся в трехмерной периодической решетке ($a = b = c$, рис. 1) ферромагнитных наносфер при постоянном поле подмагничивания $H_0 = 1000$ Э на частоте $f = 30$ ГГц. Ферромагнитные металлические наносферы радиусом $r = 150$ нм (материал наночастиц – железо с параметрами: константа обменного взаимодействия $\mu_0 q = 2,2 \cdot 10^{-9}$ Э·см²; проводимость $\sigma = 1,03 \cdot 10^5$ Ом⁻¹·см⁻¹; параметр диссипации $\alpha = 0,0023$ [3]; намагниченность насыщения $4\pi M_0 = 21580$ Гс) находятся в немагнитной матрице – среде с относительными диэлектрической и магнитной проницаемостями $\epsilon_v = 2,25$, $\mu_v = 1$.

На рис. 2 приведены результаты расчета постоянных распространения правополяризованной и левополяризованной волн (кривые 1, 2) при продольном поле подмагничивания $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$, а также обыкновенной и необыкновенной волн (кривые 3, 4) при поперечном поле подмагничивания $\vec{H}_0 = H_0 \vec{x}_0$ в зависимости от соотношения радиуса r наночастицы и периода решетки a .

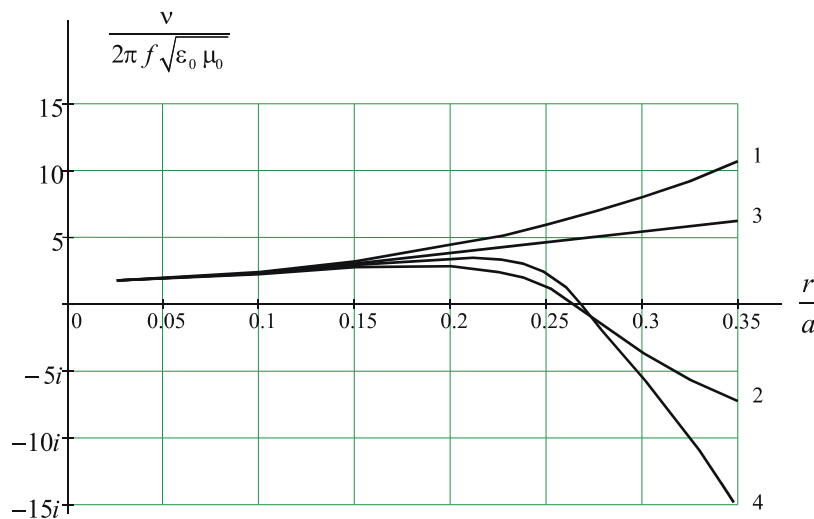


Рис. 2 Постоянные распространения продольных и поперечных волн в периодической решетке из ферромагнитных металлических наносфер в зависимости от периода решетки a : кривые 1, 2 – $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$; 3, 4 – $\vec{H}_0 = H_0 \vec{x}_0$; $r = 150$ нм; $H_0 = 1000$ Э; $\alpha = 0,0023$, $\epsilon_v = 2,25$, $\mu_v = 1$; $f = 30$ ГГц

Определим эффективные электромагнитные параметры наноструктурированной среды на основе решетки магнитных наночастиц. Введем тензор

эффективной магнитной проницаемости гиромангнитной наноструктурированной среды, который является тензором второго ранга

$$\vec{\mu} = \begin{vmatrix} \mu_1^\Sigma & i\mu_2^\Sigma & 0 \\ -i\mu_2^\Sigma & \mu_1^\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

и эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_1^Σ , являющуюся скалярной величиной. Как известно [2], в неограниченной гиромангнитной среде в направлении постоянного поля подмагничивания $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$ распространяются продольные правополяризованная и левополяризованная волны с постоянными распространения:

$$\Gamma_{\text{пр}} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 \mu_0 (\mu_1 + \mu_2)}; \quad (9)$$

$$\Gamma_{\text{лв}} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 \mu_0 (\mu_1 - \mu_2)}, \quad (10)$$

а в направлении, перпендикулярном полю подмагничивания $\vec{H}_0 = H_0 \vec{x}_0$, – поперечные обыкновенная и необыкновенная волны с постоянными распространения:

$$\Gamma_{\text{об}} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 \mu_0}; \quad (11)$$

$$\Gamma_{\text{нб}} = 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_1 \mu_0 \frac{\mu_1^2 - \mu_2^2}{\mu_1}}. \quad (12)$$

Сравнивая ход кривых на графике (рис. 2) с дисперсионными уравнениями (9)–(12), можно заметить, что кривые 1, 2 характеризуют правополяризованную и левополяризованную волны, соответственно; кривые 3, 4 – обыкновенную и необыкновенную волны, соответственно.

Подставляя рассчитанные значения постоянных распространения продольных и поперечных волн $\Gamma_0 = v$ в уравнения (9)–(12) и решая эти уравнения относительно неизвестных μ_1^Σ , μ_2^Σ , ϵ_1^Σ , получаем комплексные значения эффективных электромагнитных параметров – компоненты тензора эффективной магнитной проницаемости μ_1^Σ , μ_2^Σ , и эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ_1^Σ , приведенные в табл. 1.

Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что гиромангнитная наноструктурированная среда на основе решетки ферромагнитных металлических наносфер обладает лучшими электрическими и магнитными характеристиками, чем ферриты со структурой шпинели и граната [2], которые широко используются в технике сверхвысоких частот. Магнитные потери меньше на два порядка, диэлектрические потери – на порядок, значения недиагональных компонентов μ_2^Σ тензора, характеризующих гиротропные свойства среды, выше примерно в два раза.

Таблица 1

Компоненты μ_1^{Σ} , μ_2^{Σ} тензора эффективной магнитной проницаемости и эффективная диэлектрическая проницаемость ε_1^{Σ} гиромангнитной наноструктурированной среды на основе решетки ферромагнитных металлических (железо) наносфер в зависимости от соотношения радиуса r наночастицы и периода решетки a на частоте $f = 30$ ГГц

r/a	μ_1^{Σ}	μ_2^{Σ}	ε_1^{Σ}
0,1	$0,995 - 1,164i \cdot 10^{-6}$	$0,05 - 2,161i \cdot 10^{-7}$	$3,891 - 6,436i \cdot 10^{-5}$
0,15	$0,984 - 8,84i \cdot 10^{-6}$	$0,168 - 1,641i \cdot 10^{-6}$	$5,223 - 1,197i \cdot 10^{-5}$
0,2	$0,963 - 3,725i \cdot 10^{-5}$	$0,398 - 6,917i \cdot 10^{-6}$	$8,938 - 5,623i \cdot 10^{-4}$
0,25	$0,927 - 1,137i \cdot 10^{-4}$	$0,777 - 2,111i \cdot 10^{-5}$	$14,141 - 1,075i \cdot 10^{-3}$
0,3	$0,874 - 2,829i \cdot 10^{-4}$	$1,343 - 5,252i \cdot 10^{-5}$	$20,829 - 3,786i \cdot 10^{-3}$
0,35	$0,801 - 6,114i \cdot 10^{-4}$	$2,132 - 1,135i \cdot 10^{-4}$	$29,004 - 8,317i \cdot 10^{-3}$

Список литературы

1. **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1978. – 543 с.
2. **Гуревич, А. Г.** Магнитные колебания и волны / А. Г. Гуревич, Г. А. Мелков. – М. : Наука, 1994.

ΣТ-АЦП С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Приводится описание разработанного интегрирующего АЦП на основе преобразователя напряжения в интервал времени с предварительной интегрально-импульсной модуляцией. В нем реализованы основные принципы Σ-АЦП: передискретизация, шейпинг шума квантования, цифровая фильтрация и децимация. С целью снижения требований к этим процедурам проводится предварительная минимизация погрешности от краевых эффектов. Приводятся результаты экспериментального анализа влияния сетевой помехи на точность преобразования при реализации различных цифровых фильтров.

Введение

Известно [1, 2], что преобразователи данных (как АЦП, так и ЦАП) могут классифицироваться по двум основным критериям: преобразователи, работающие на частоте, близкой к частоте Найквиста, и преобразователи с передискретизацией. В большинстве случаев линейность и точность первых определяются точностью и технологическим разбросом параметров аналоговых компонентов, применяемых в исполнении. Технология изготовления этих компонентов ограничивает разброс на уровне 0,02 %, поэтому, как правило, эффективная разрядность для таких преобразователей также ограничивается на уровне около 12 бит. Однако для множества практических задач, например, для непосредственной оцифровки сигналов малого уровня, характерных для тензометрических датчиков, термопар и т.п., требуется высокая линейность и разрешение N на уровне 18 или даже 20 бит. Удовлетворить эти требования способны только интегрирующие преобразователи, однако в них требуется хотя бы 2^N периодов тактовой частоты для преобразования одного кванта, что делает их быстродействие слишком низким для большинства применений обработки сигнала. Решение проблемы пришло на стыке 1980–1990-х гг., когда были разработаны и реализованы первые интегрирующие преобразователи с передискретизацией, в частности ΣΔ-АЦП. С их помощью удалось достигнуть уникальных метрологических характеристик – разрешения до 24 двоичных разрядов при отсутствии жестких требований к точности, стабильности элементной базы и приемлемом быстродействии [2].

Сегодняшние тенденции развития ΣΔ-АЦП направлены на расширение частотного диапазона входного сигнала (без уменьшения отношения сигнал-шум), увеличение быстродействия, удешевление и миниатюризацию. Теория и практика данной области продолжает активно развиваться, поэтому в будущем можно ожидать расширения области применения этих устройств. Следует отметить, что некоторые из перечисленных выше целей можно достичь введением передискретизации и других связанных с ней концепций в интегрирующих АЦП с другими видами промежуточной модуляции.

1 Основные принципы реализации ΣΔ-АЦП

На рис. 1 изображена структурная схема интегрирующего АЦП на основе ΣΔ-модулятора первого порядка [1].

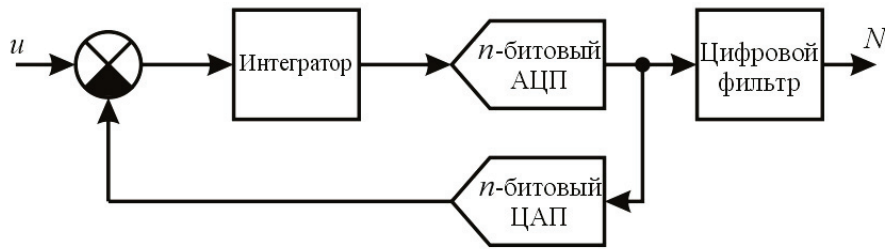


Рис. 1

Модулятор включает в себя разностное звено на входе, интегратор, n -битовый АЦП (квантователь) и n -битовый ЦАП.

Базовые концепции, реализуемые в $\Sigma\Delta$ -АЦП (и ЦАП), включают, с одной стороны, $\Sigma\Delta$ -передискретизацию и формирование (shaping) спектра шума с целью переноса большей части его энергии в область верхних частот, осуществляемые модулятором, и, с другой стороны, цифровую фильтрацию и децимацию (прореживание), осуществляемые цифровым фильтром. Цифровой фильтр-дециматор на выходе $\Sigma\Delta$ -модулятора сглаживает его выходной сигнал, подавляя помехи, шум квантования и другие высокочастотные шумы, предотвращая их проникновение в полосу частот полезного сигнала при возвращении от частоты передискретизации к частоте Найквиста.

В структуре интегрирующего АЦП, реализующего вышеописанные концепции, в общем случае не обязательно использование именно $\Sigma\Delta$ -модуляции [3]. Принципиально возможно применение любого импульсного модулятора; в частности, существует возможность использования хорошо теоретически и практически проработанных широтно-импульсных модуляторов. Для данного типа преобразователей характерно наличие так называемой погрешности от краевых эффектов, определяемой как погрешность от асинхронности частных и полных циклов преобразования [4]. Эта составляющая погрешности обусловлена неравенством значений обобщенной развертывающей функции $R(t)$ в начале и конце полного цикла преобразования. На рис. 2 показан пример возникновения этой погрешности в интегрирующем преобразователе напряжения в интервал времени (ИПНВ) с промежуточным интегрально-импульсным преобразованием [5]. На рис. 2: $T_{\text{ч}}$ – время частного цикла преобразования, $T_{\text{об}}$ – время общего цикла преобразования, $t_{\text{н}}$ – начало преобразования, $t_{\text{к}}$ – конец преобразования, $R(t)$ – обобщенная развертывающая функция, $g_x(t)$ – весовая функция. Наличие $\Delta R \neq 0$ нарушает идеализированное уравнение преобразования $R(t_{\text{к}}) - R(t_{\text{н}}) = 0$ и приводит его к виду $R(t_{\text{к}}) - R(t_{\text{н}}) = \Delta R$.

Отметим, что в структуре $\Sigma\Delta$ -АЦП эта погрешность также присутствует и подавляется как шум квантования, не входящий в полосу частот полезного сигнала, на стадии цифровой фильтрации. Это, естественно, предъявляет повышенные требования к выбору типа и порядка цифрового фильтра [1, 2]. В предлагаемом $\Sigma\Delta$ -АЦП предпринимаются специальные меры по уменьшению составляющей этой погрешности, что исключает необходимость цифровой фильтрации шума, порождаемого этой погрешностью.

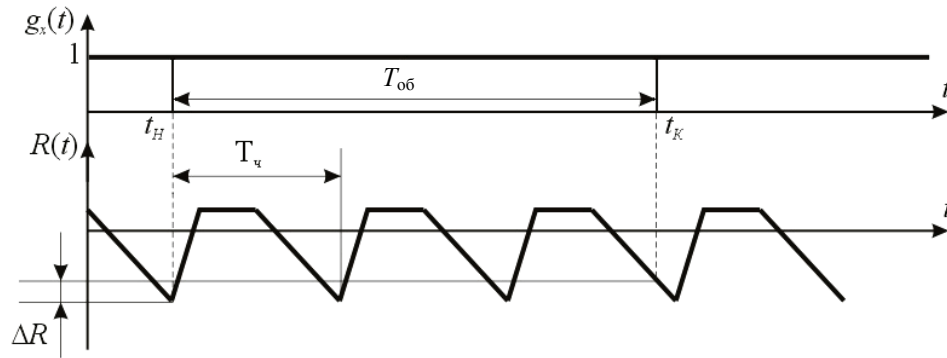


Рис. 2

2 Промежуточный модулятор $\Sigma\Delta$ -АЦП на основе интегрирующего времяимпульсного преобразователя

Разработанный интегрирующий преобразователь напряжения в код состоит из аналоговой и цифровой частей. В аналоговой части ИАЦП реализуется алгоритм времяимпульсного преобразования с промежуточной интегрально-импульсной модуляцией, что позволяет исключить пропуски информации о преобразуемой величине и завершить переходный процесс при скачкообразном изменении входной величины за один частный цикл работы преобразователя.

На рис. 3 показана функциональная схема ИПНВ, содержащая интегрально-импульсный модулятор (ИИМ) и двухтактный интегрирующий времяимпульсный преобразователь (ИВИП).

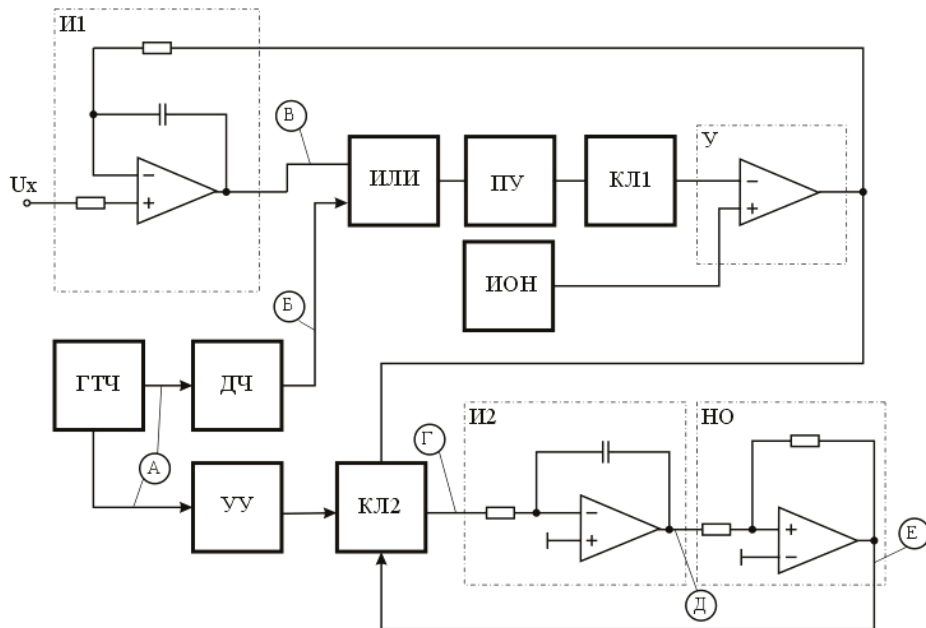


Рис. 3

ИИМ реализован на основе интегратора И1, логического элемента ИЛИ, промежуточного усилителя ПУ напряжения, ключа КЛ1, усилителя У, источника опорного напряжения ИОН, генератора тактовой частоты ГТЧ,

делителя частоты ДЧ и устройства управления УУ. Двухтактный времяимпульсный преобразователь содержит интегратор И2, аналоговый ключ КЛ2 и нуль-орган НО. Временные диаграммы напряжений в различных точках схемы представлены на рис. 4.

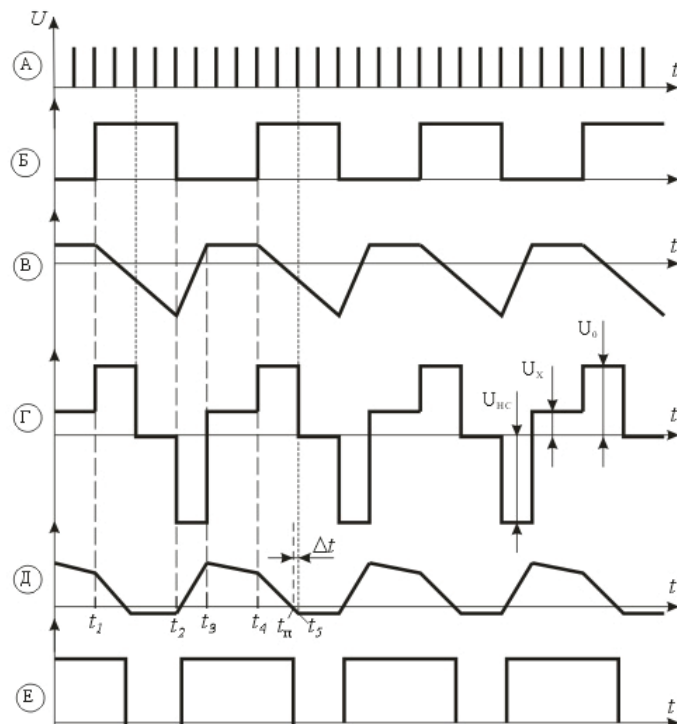


Рис. 4

Для уменьшения погрешности от краевых эффектов используется дискретизация выходного сигнала ИВИП за время частного цикла таким образом, чтобы на момент начала нового частного цикла преобразования интегратор И2 учитывал остаток интегрального значения напряжения за предыдущий частный цикл.

Рассмотрим работу ИВИП по принципиальной схеме, представленной на рис. 5, при выполнении следующих условий: $u_x(t) > 0$, $U_0 > 0$ и $u_x(t) \leq U_0/2$. Для упрощения анализа, без изменения общности рассуждений, будем считать входное напряжение $u_x(t)$ постоянным в течение всей длительности цикла преобразования.

По сигналу с ГТЧ в момент t_1 ключ КЛ1 на базе диода VD3 запирается, поскольку транзистор VT1 промежуточного усилителя открывается положительным тактовым напряжением. Значение напряжения на выходе ИИМ равно U_0 , поскольку усилитель У на базе DA3 работает в режиме повторителя напряжения. Поэтому на интервале времени $(t_2 - t_1)$ напряжение на выходе интегратора И1 есть результат интегрирования разности $u_x(t)$ и U_0 . К моменту времени t_2 оно достигнет значения

$$U_{И1}(t_2) = \frac{T}{2\tau_1}(u_x - U_0), \quad (1)$$

где $\tau_1 = R1C1$ – постоянная времени интегратора И1.

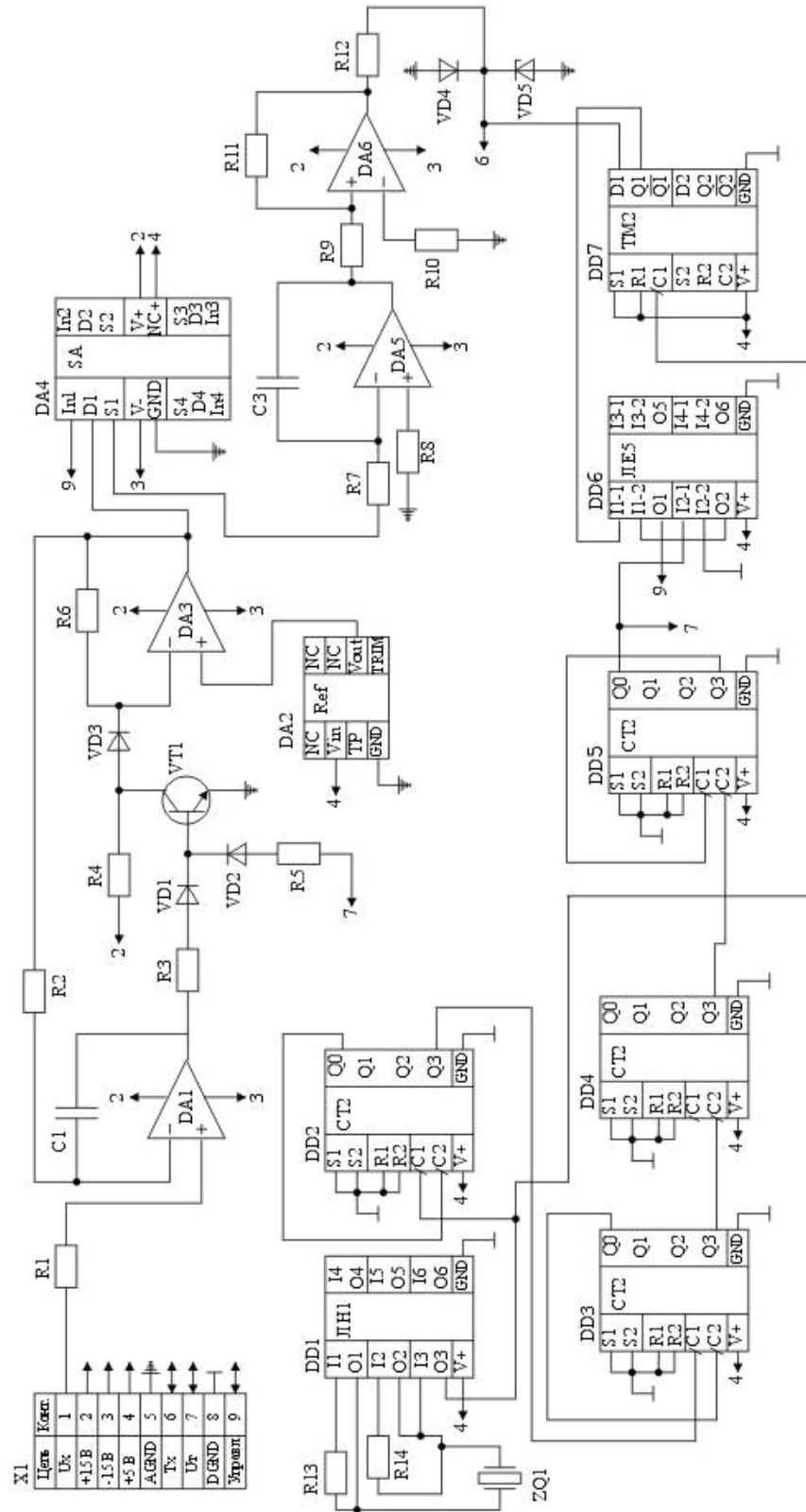


Рис. 5

В момент времени t_2 изменение тактового напряжения U_T приводит к запиранию транзистора VT1, вследствие чего отпирается диод VD3, а напряжение на выходе ИИМ скачком изменяется до напряжения насыщения отрицательной полярности U_{nc} операционного усилителя DA3. На интервале времени $(t_3 - t_2)$ напряжение на выходе DA1 изменяется под влиянием разности напряжений $u_x(t)$ и U_{nc} и к моменту t_3 достигает значения

$$U_{И1}(t_3) = \frac{1}{\tau_1} [u_x(t_3 - t_1) - U_0(t_2 - t_1) - U_{nc}(t_3 - t_2)]. \quad (2)$$

В момент времени t_3 усилитель напряжения У на основе DA3 выходит из насыщения, в результате чего замыкается контур глубокой отрицательной обратной связи (ООС) через открытый диод VD3 и резистор R2, охватывающей интегратор И1, промежуточный усилитель на основе VT1 и усилитель У. Для входного сигнала $u_x(t)$ данный замкнутый контур представляет собой апериодическое звено первого порядка с постоянной времени $\tau_1/(k_2k_3)$, где k_2 – коэффициент усиления усилителя на основе DA3, а k_3 – коэффициент усиления промежуточного усилителя. В результате напряжение на выходе УК после короткого переходного процесса (поскольку $\tau_1/(k_2k_3) \ll 1$) становится равным $u_x(t)$ и поддерживается на этом уровне до момента t_4 начала нового частного цикла преобразования.

Поскольку напряжения на выходе DA1 в моменты времени t_1 и t_3 равны, из (2) легко найти, что

$$U_{nc}(t_3 - t_2) = U_0 \frac{T}{2} - u_x(t_3 - t_2). \quad (3)$$

Напряжение с выхода ИИМ через аналоговый ключ DA4 поступает на вход двухтактного времяимпульсного преобразователя. В момент t_2 на вход интегратора И2 на основе DA5 поступает напряжение U_{nc} , в результате чего срабатывает нуль-орган на основе DA6, скачком изменяя свое состояние. Выходное напряжение DA5 представляет собой интеграл поступающего с выхода DA4 напряжения, которое в интервале времени $(t_3 - t_2)$ равно U_{nc} , в интервале $(t_4 - t_3)$ равно $u_x(t)$, а в интервале $(t_5 - t_4)$ равно U_0 . В момент t_n выходное напряжение интегратора И2 переходит через ноль, вследствие чего нуль-орган скачком изменяет свое состояние. Сигнал с выхода DA6 поступает на вход устройства управления, собранное на микросхемах DD7 и DD8, которое с приходом первого очередного импульса генератора тактовой частоты (момент t_5) выдает сигнал о размыкании ключа DA4. Интегратор И2 за время Δt продолжает интегрировать опорное напряжение, а после размыкания ключа находится в определенном ненулевом состоянии до начала нового частного цикла работы преобразователя, что позволяет учитывать остаток интеграла за предыдущий частный цикл преобразования.

Тактовое напряжение для устройства управления ключом подается непосредственно с источника тактовой частоты на микросхеме DD1. Делитель частоты выполнен на микросхемах DD2-DD4 таким образом, чтобы обеспечить синхронизацию тактовых частот элемента ИЛИ и устройства управления.

Выходной код ИАЦП представляет сумму результатов преобразования n примыкающих частных циклов, и погрешность от краевых эффектов в итоге уменьшится минимум в n раз. Это отнюдь не означает, что в данном случае придется жертвовать быстродействием, т.к. с увеличением числа частных циклов можнократно увеличивать тактовую частоту (т.е. уменьшать длительность

частных циклов). Причем в данном случае существенно упрощается цифровая фильтрация и децимация выходной последовательности, основанная на применении более простых весовых функций, нежели в случае $\Sigma\Delta$ -АЦП.

3 Влияние сетевой помехи на точность преобразования

С целью определения метрологических характеристик произведено натурное моделирование разработанного ИАЦП на базе лабораторной настольной станции NI ELVIS с использованием современной отечественной и зарубежной элементной базы. Цифровая фильтрация выходного сигнала модулятора $\Sigma\Delta$ -АЦП была выполнена на основе микропроцессора PIC16F876A с выводом результата каждого частного цикла преобразования в СОМ-порт с частотой 2 кГц. Затем средствами программы MathCad производилась цифровая обработка этой выборки с целью применения усредняющих окон. Основной задачей эксперимента являлось выявление степени подавления этими окнами помехи от промышленной сети частотой 50 Гц при условии ее вариации в пределах $\pm 1\text{--}2\%$. На вход ИАЦП подавался сигнал, представляющий собой постоянное напряжение 2,0 В с наложенной на него синусоидальной помехой амплитудой 0,5 В. После применения весовой функции производился подсчет среднего относительного отклонения выходного кода от его математического ожидания. Результаты эксперимента сведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип усредняющего окна	Частота помехи, Гц				
	49	49,5	50	50,5	51
γ , окно Дирихле, 40 ступеней	0,459	0,167	$5,25 \cdot 10^{-3}$	0,198	0,526
γ , окно Бартлетта, 80 ступеней	0,014	$7,424 \cdot 10^{-3}$	$4,204 \cdot 10^{-3}$	$4,051 \cdot 10^{-3}$	$9,251 \cdot 10^{-3}$
γ , окно Парзена, 80 ступеней	0,698	0,478	0,07	0,467	0,516
γ , окно Ханна, 80 ступеней	0,15	0,051	$5,59 \cdot 10^{-3}$	0,059	0,164

Наглядно оценить подавление сетевой помехи при условии указанной вариации частоты помехи позволяет график, приведенный на рис. 6.

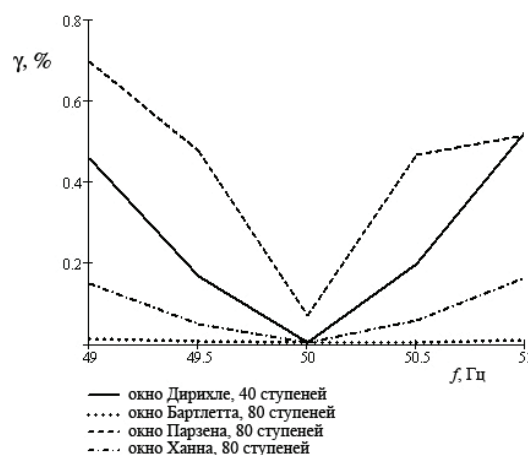


Рис. 6

Заключение

1. В разработанном ИАЦП с промежуточным времяимпульсным преобразованием реализованы все основные концепции $\Sigma\Delta$ -АЦП: передискретизация, шейпинг шума квантования, цифровая фильтрация и децимация. Использование алгоритма уменьшения погрешности от краевых эффектов устраняет необходимость подавления порождаемого этой погрешностью шума с помощью цифрового фильтра, что ведет к упрощению его конструкции.

2. Оптимальным усредняющим окном для цифровой фильтрации и децимации выходной последовательности в условиях влияния сетевой помехи является окно Бартлетта (sinc^2 -фильтр), тогда как оптимальным фильтром для $\Sigma\Delta$ -модулятора второго порядка является sinc^3 фильтр (окно Парзена). Таким образом, в сравнении с $\Sigma\Delta$ -АЦП, цифровой фильтр реализуется проще с точки зрения уменьшения числа его каскадов. Это, в свою очередь, ведет к понижению требований к точности реализации ступенчатой весовой функции и, следовательно, уменьшается время преобразования всего ИАЦП.

Список литературы

1. **Schreier, R.** Understanding Delta-Sigma Data Converters. / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, 2005. – 435 с.
2. **Кестер, У.** Аналого-цифровое преобразование : пер. с англ. / Уолт Кестер. – М. : Техносфера, 2007. – 1015 с.
3. **Шахов, Э. К.** Реализация концепции $\Sigma\Delta$ -АЦП в интегрирующих АЦП с другими видами импульсной модуляции / Э. К. Шахов, В. Н. Ашанин, А. И. Надев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2006. – № 6. – С. 226–236. – (Технические науки).
4. **Шахов, Э. К.** Интегрирующие разветвляющие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
5. **Ашанин, В. Н.** Теоретическое и экспериментальное исследование методов совершенствования интегрирующих аналого-цифровых преобразователей : дис. ... к.т.н. / В. Н. Ашанин. – Л. : ЛПИ, 1982. – 232 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИПЕРСИНГУЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВИБРАТОРА

Предложены численные методы решения уравнений Поклингтона и Галлена, являющихся основным аппаратом моделирования электрических вибраторов конечной длины. Получен новый класс гиперсингулярных интегральных уравнений и проведено сравнение результатов моделирования электрических вибраторов гиперсингулярными интегральными уравнениями и уравнениями Поклингтона и Галлена.

Введение

Основным математическим аппаратом, применяемым при моделировании электромагнитных процессов в электрическом вибраторе, являются интегродифференциальные уравнения Поклингтона и Харрингтона [1] и интегральное уравнение Галлена [1]. В последнее время к исследованию этих процессов привлекаются также сингулярные интегральные уравнения [2].

В качестве численных методов для решения уравнений Поклингтона и Галлена привлекается, как правило, метод моментов и его модификации.

В данной работе выводится гиперсингулярное интегральное уравнение, описывающее бесконечно тонкий электрический вибратор, предлагается и обосновывается численный метод его решения. Помимо этого, в работе предлагается несколько численных методов решения уравнений Поклингтона и Галлена и проводится сравнение полученных численных результатов.

1 Постановка задачи

Простейший электрический вибратор представляет собой цилиндрический проводник длиной $l_1 + l_2$ (далее в работе рассматривается симметричный вибратор, т.е. $l_1 = l_2 = l$) и радиусом a , питаемый генератором высокой частоты. Под воздействием ЭДС V генератора в вибраторе возникают электрические токи, которые распределяются по его поверхности таким образом, что возбуждаемое ими электромагнитное поле удовлетворяет уравнениям Максвелла, которые в дифференциальной форме записываются в виде

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H}_m = i\omega\epsilon \vec{E}_m + \vec{j}_m^{\text{э}}, \\ \operatorname{rot} \vec{E}_m = -i\omega\mu \vec{H}_m - \vec{j}_m^{\text{м}}, \end{cases}$$

где $\vec{E}_m$ – вектор комплексной амплитуды напряженности электрического поля;

$\vec{H}_m$ – вектор комплексной амплитуды напряженности магнитного поля;
 ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; μ – магнитная проницаемость

среды; $\vec{j}_m^{\text{э}}$ – вектор комплексной амплитуды объемной плотности сторонне-

го электрического тока; $\vec{j}_m^M$ – вектор комплексной амплитуды объемной плотности стороннего магнитного тока.

Кроме того, возбуждаемое электромагнитное поле должно удовлетворять граничным условиям на поверхности проводника и условию излучения на бесконечности.

Полное электромагнитное поле вибратора в любой точке внешнего пространства может быть определено электрическими $\vec{J}^E$ и магнитными $\vec{J}^M$ токами, распределенными по замкнутой цилиндрической поверхности, окружающей вибратор. Вследствие осевой симметрии возбуждения вибратора электрический ток на боковой поверхности проводника имеет только продольную составляющую J_z^E , а в торцевых поверхностях – радиальные составляющие J_ρ^E . Магнитный поверхностный ток имеет только азимутальную составляющую J_ϕ^M .

Внутренняя задача теории вибратора состоит в нахождении функции распределения эквивалентных электрических и магнитных токов по продольной координате z . В простейшем случае для вибраторов малой толщины внутренняя задача сводится к интегральному уравнению Галлена.

При построении физической модели тонкого вибратора используются следующие предположения [1, 2]:

1) рассматривается случай тонкого вибратора ($2l \gg a$), и предполагается, что длина волны λ значительно больше радиуса a ($\lambda \gg a$);

2) поверхностные электрические токи J_z^E и магнитные эквивалентные токи J_ϕ^M заменяются расположенной на оси вибратора бесконечно тонкой нитью непрерывного тока $I_z(z) = 2\pi a J_z^E(z)$, обращаемого в нуль на концах вибратора;

3) поле излучения вибратора не зависит от ϕ (в цилиндрической системе координат (z, ρ, ϕ)) и определяется составляющими E_ρ, E_z, H_ϕ .

Сформулированные предположения математической модели тонкого электрического вибратора приводят к уравнению, связывающему векторный потенциал распределения токов $I_z(z)$ и касательную составляющую вектора напряженности электрического поля $E_z(z)$. Данное уравнение представляет собой интегральное уравнение Поклингтона [1, с. 222]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) \int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz' = -i\omega\epsilon_0\epsilon E_z(z), \quad (1)$$

где $I_z(z) = 2\pi a J_z^E(z)$, $G(z - z')$ – функция Грина,

$$G(z - z') = \frac{e^{-i\beta\sqrt{(z-z')^2 + a^2}}}{4\pi\sqrt{(z-z')^2 + a^2}}. \quad (2)$$

Наряду с уравнением Поклингтона многими авторами используется уравнение Галлена [1, с. 222]:

$$\int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz' = A \cos \beta z + \sin \beta z - \frac{i2\pi V}{W} \sin \beta |z|, \quad (3)$$

где A и B – произвольные константы, определяемые из граничных условий обращения тока в нуль на концах вибратора; $W = \frac{\beta}{\omega \epsilon}$.

Уравнение Поклингтона в виде (1) является при $a > 0$ интегральным уравнением первого рода. Интегральные уравнения первого рода являются некорректными, и их решение требует регуляризации [3]. В физическом отношении уравнение Поклингтона также является некорректным, т.к. вибратор моделируется бесконечно тонкой нитью, а в уравнении (1) присутствует параметр a ($a > 0$). Поэтому представляет интерес модификация уравнения Поклингтона, в которой $a = 0$.

Замечание. Подробный анализ некорректных в физическом отношении задач радиотехники и связи содержится в работе [2].

2 Гиперсингулярные интегралы

Определение гиперсингулярных интегралов было введено в работе Адамара [4], и подразумевало выделение в интеграле конечной части. Позднее Чикин [5] объединил определения конечной части интеграла, данное Адамаром, и интеграла в смысле главного значения по Коши.

Нам понадобится следующее определение гиперсингулярных интегралов.

Определение 1. Конечной частью интеграла $\int_{-1}^1 \frac{\varphi(\tau)}{|\tau - c|} d\tau$, $-1 \leq c \leq 1$, называется предел

$$\int_{-1}^1 \frac{\varphi(\tau)}{|\tau - c|} d\tau = \lim_{\eta \rightarrow 0} \left[\int_{-1}^{c-\eta} \frac{\varphi(\tau)}{|\tau - c|} d\tau + \int_{c+\eta}^1 \frac{\varphi(\tau)}{|\tau - c|} d\tau - f(\eta) \ln |\eta - c| \right],$$

где функция $f(\eta)$ удовлетворяет следующим условиям: 1) имеет непрерывные производные до $(p-1)$ порядка в окрестности точки c ; 2) предел существует.

3 Приближенное решение уравнения Поклингтона

При сделанных в разд. 1 предположениях электромагнитные процессы в электрическом вибраторе описываются уравнением Поклингтона

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) \int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz' = f(z), \quad -l \leq z \leq l. \quad (4)$$

Здесь a – радиус цилиндра, которым заменяется бесконечно тонкая нить. Отметим, что в уравнении (4) естественно считать $-L \leq z \leq L$, где $L \geq l$, и положить

$$\int_{-l}^l I_z(z') G(\pm L - z') dz' = 0.$$

Так как в уравнении (4) ядро $G(z)$ является бесконечно дифференцируемой функцией всюду, за исключением точек $z = \pm ia$, то в левой части этого уравнения операторы дифференцирования и интегрирования перестановочны.

В результате имеем

$$\int_{-l}^l h(t - \tau) I_z(\tau) d\tau = f(t), \quad (5)$$

где $h(t - \tau) = \frac{\partial^2 G(t - \tau)}{\partial t^2} + \beta^2 G(t - \tau)$.

Введем функцию

$$u(t) = \begin{cases} I_z(t), & t \in [-l, l], \\ 0, & t \notin [-l, l]. \end{cases}$$

Учитывая, что функция $h(t - \tau)$ определена на всей числовой оси, интегральное уравнение (5) эквивалентно следующему

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) u(\tau) d\tau = f(t). \quad (6)$$

Для решения данного уравнения воспользуемся преобразованием Фурье. Напомним, что прямое преобразование определяется формулой

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau, \text{ а обратное преобразование — формулой}$$

$$f(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega.$$

Применяя преобразование Фурье к уравнению (6), имеем

$$\sqrt{2\pi} U(\omega) H(\omega) = F(\omega), \quad (7)$$

где $U(\omega)$, $H(\omega)$, $F(\omega)$ — преобразования Фурье функций $u(t)$, $h(t)$, $f(t)$ соответственно. Преобразование Фурье $H(\omega)$ может быть представлено в следующей форме:

$$H(\omega) = -\omega^2 \bar{G}(\omega) + \beta^2 \bar{G}(\omega),$$

где $\bar{G}(\omega)$ — преобразование Фурье для функции $G(t)$.

Решение уравнения (7) может быть найдено непосредственно в следующей форме:

$$U(\omega) = \frac{F(\omega)}{\sqrt{2\pi} [\beta^2 - \omega^2] \bar{G}(\omega)}.$$

Приближенным решением уравнения Поклингтона тогда будет функция, полученная с помощью обратного преобразования Фурье:

$$u(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{F(\omega)}{\sqrt{2\pi} [\beta^2 - \omega^2] \bar{G}(\omega)} \right\} e^{i\omega\tau} d\omega.$$

Однако такая функция может не существовать, т.к. последний интеграл может быть расходящимся из-за влияния высоких частот ω различных помех [3] при $\omega = \pm\beta$ и в случае обращения $\bar{G}(\omega)$ в нуль в конечных точках. Поэтому более предпочтительными являются итерационные методы. Рассмотрим несколько итерационных методов решения уравнения (7).

Предположим вначале, что существует комплексное число γ такое, что

$$|1 - \gamma\sqrt{2\pi}H(\omega)| \leq q < 1 \quad (8)$$

при $-\infty \leq \omega \leq \infty$.

Тогда из теоремы Банаха [6] следует сходимость метода простой итерации

$$U_{n+1}(\omega) = U_n(\omega) - \gamma [\sqrt{2\pi}H(\omega)U_n(\omega) - F(\omega)]. \quad (9)$$

Обозначив через $U^*(\omega)$ предел последовательности $U_n(\omega)$, $n = 0, 1, 2, \dots$, можно показать, что $\|U^*(\omega) - U_n(\omega)\|_{C(-\infty, \infty)} \leq Aq^n$.

В случае, если вместо условия (8) при некотором комплексном γ выполняется условие

$$|1 - \gamma\sqrt{2\pi}H(\omega)| \leq 1 \quad (10)$$

при $-\infty \leq \omega \leq \infty$, то на основании теоремы Обломской [7] можно доказать сходимость итерационного процесса

$$U_{n+1}(\omega) = \alpha_n U_n(\omega) + (1 - \alpha_n) [U_n(\omega) - \gamma (\sqrt{2\pi}H(\omega)U_n(\omega) - F(\omega))],$$

где $0 < \alpha_* \leq \alpha_n \leq \alpha^* < 1$, $n = 0, 1, 2, \dots$

В случае, если условия (8) или (10) не выполняются, для решения уравнения Поклингтона может быть использована следующая более общая схема. Для определенности остановимся на случае, когда выполняется условие (10). На оси $-\infty \leq \omega \leq \infty$ введем точки ω_k , $k = 0, 1, \dots, M$, таким образом, чтобы значения функции $\sqrt{2\pi}H(\omega)$ лежали внутри и на сторонах угла раствора меньшего π при $\omega \in \Delta_k$, $k = 0, 1, \dots, M$, где $\Delta_0 = (-\infty, \omega_1]$, $\Delta_k = [\omega_k, \omega_{k+1}]$, $k = 1, 2, \dots, M-1$, $\Delta_M = [\omega_M, \infty)$.

В этом случае каждому сегменту Δ_k можно поставить в соответствие константу γ_k , $k = 0, 1, \dots, M$, такую, что

$$\left| 1 - \gamma_k \sqrt{2\pi} H(\omega) \right| \leq 1,$$

при $\omega \in \Delta_k$, $k = 0, 1, \dots, M$.

Решение уравнения (7) может быть получено параллельным итерационным методом

$$U_k^{n+1}(\omega) = \alpha_n U_k^n(\omega) + (1 - \alpha_n) \left[U_k^n(\omega) - \gamma_k \left(\sqrt{2\pi} H(\omega) U_k^n(\omega) - F(\omega) \right) \right],$$

где $\omega \in \Delta_k$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $k = 0, 1, \dots, M$, сходимость которого при каждом k , $k = 0, 1, \dots, M$, следует из теоремы Обломской.

Тогда $U^n(\omega) = \sum_{k=0}^M U_k^n(\omega)$, и n -е приближение к решению уравнения

(6) получаем, применив обратное преобразование к функции $U^n(\omega)$.

Нетрудно записать предыдущую итерационную схему во временной области. Не останавливаясь на этом, опишем практически легко реализуемый итерационный метод.

Возьмем множество узлов ω_k , $k = 1, 2, \dots, N$, в которых функция $H(\omega)$ не обращается в ноль, и каждому узлу сопоставим итерационную схему

$$U_{n+1}(\omega_k) = U_n(\omega_k) - \gamma_k \left[\sqrt{2\pi} H(\omega_k) U_n(\omega_k) - F(\omega_k) \right], \quad (11)$$

где $k = 1, 2, \dots, N$, $n = 0, 1, 2, \dots$, $\gamma_k = \frac{1}{2\sqrt{2\pi} H(\omega_k)}$.

Вычислив $U_n(\omega_k)$ при достаточно больших значениях n , находим приближенное значение $I_z(t)$ по квадратурным формулам вычисления обратного преобразования Фурье.

Результаты применения метода преобразования Фурье и итерационной схемы (11) для уравнения Поклингтона представлены на рис. 1.

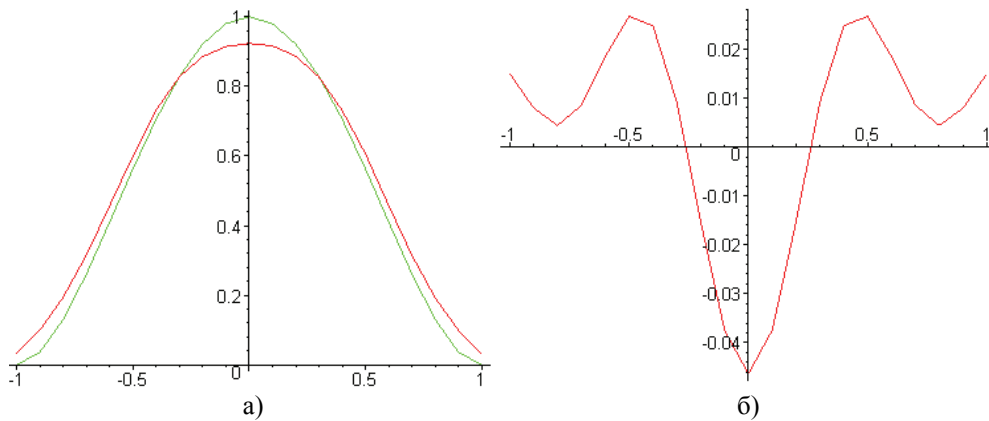


Рис. 1 Графики точного и приближенного решения уравнения Поклингтона: а – действительная часть решения (максимальная абсолютная погрешность равна 0,076558); б – мнимая часть решения (максимальная абсолютная погрешность равна 0,046401)

Значение параметров были выбраны следующими: $I_z(z') = (1 - z'^2)^2$; $\beta = 12$; $a = 1$; $l = 1$; $L = 4$; $N = 50$; преобразование Фурье выполнялось на отрезке $[-10, 10]$.

4 Уравнение Галлена

Одной из модификаций уравнения Поклингтона является уравнение Галена (3).

При непосредственном применении этого уравнения возникает следующий вопрос: в какой области значений z уравнение Галлена эквивалентно уравнению Поклингтона? В самом деле, на всей числовой оси $-\infty < z < \infty$ эти уравнения не эквивалентны. Более того, уравнение Галлена не имеет смысла при достаточно больших значениях z . Действительно, функция

$$u(z) = \int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz'$$

стремится к нулю при любых ограниченных значениях $I_z(z')$, в то время как правая часть уравнения (12) представляет собой колебательный процесс с конечной амплитудой.

Представляет интерес вывод уравнения, подобного уравнению Галлена, но свободного от указанного выше недостатка.

Для простоты обозначений запишем уравнение Поклингтона в виде

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) \int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz' = f(z), \quad -\infty < z < \infty. \quad (12)$$

Рассмотрение уравнения (12) в области $-\infty < z < \infty$ представляется естественным, т.к. $f(z)$ – результат измерения физических параметров и может быть осуществлен и вне сегмента $[-l, l]$.

Замечание. Функция $|f(z)|$ достаточно быстро убывает при $z \rightarrow \pm\infty$ и может быть положена равной нулю вне некоторого сегмента $[-L, L]$, где $L > l$.

Обозначим функцию $\int_{-l}^l I_z(z') G(z - z') dz'$ через $u(z)$ и рассмотрим

краевую задачу

$$\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} + \beta^2 u(z) = f(z) \quad (13)$$

при условиях

$$u(-\infty) = u(\infty) = 0. \quad (14)$$

Если значение L известно (хотя бы с некоторой погрешностью), то естественно вместо (13), (14) рассматривать краевую задачу

$$\frac{\partial^2 u(z)}{\partial z^2} + \beta^2 u(z) = f(z), \quad -L \leq z \leq L, \quad (15)$$

при условиях

$$u(-L) = u(L) = 0. \quad (16)$$

Заметим, что рассмотрение краевой задачи (15), (16) более естественно с физической точки зрения.

Общее решение уравнения (15) имеет вид

$$u(z) = A \cos \beta z + B \sin \beta z - \left(\frac{1}{\beta} \int_{-L}^z f(z') \sin \beta z' dz' \right) \cos \beta z + \left(\frac{1}{\beta} \int_{-L}^z f(z') \cos \beta z' dz' \right) \sin \beta z.$$

Из граничных условий (16) следует, что

$$A = \frac{1}{2\beta \cos \beta L} \int_{-L}^L f(z') \sin \beta(z' - L) dz', \quad B = \frac{1}{2\beta \sin \beta L} \int_{-L}^L f(z') \sin \beta(z' - L) dz'.$$

Таким образом, общее решение уравнения (15) при граничных условиях (16) примет при $-L \leq z \leq L$ следующий вид:

$$u(z) = \frac{1}{\beta} \frac{\sin \beta(z+L)}{\sin 2\beta L} \int_{-L}^L f(z') \sin \beta(z' - L) dz' + \frac{1}{\beta} \int_{-L}^z f(z') \sin \beta(z - z') dz'.$$

Замечание. Отметим, что это решение отвечает физической задаче при $2\beta L \neq \pm k\pi$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Результаты применения метода преобразования Фурье и итерационной схемы (11) для уравнения Галлена представлены на рис. 2. Значение параметров были выбраны следующими: $I_z(z') = (1 - z'^2)^2$; $\beta = 12$; $a = 1$; $l = 1$; $L = 4$; $N = 50$; преобразование Фурье выполнялось на отрезке $[-10, 10]$.

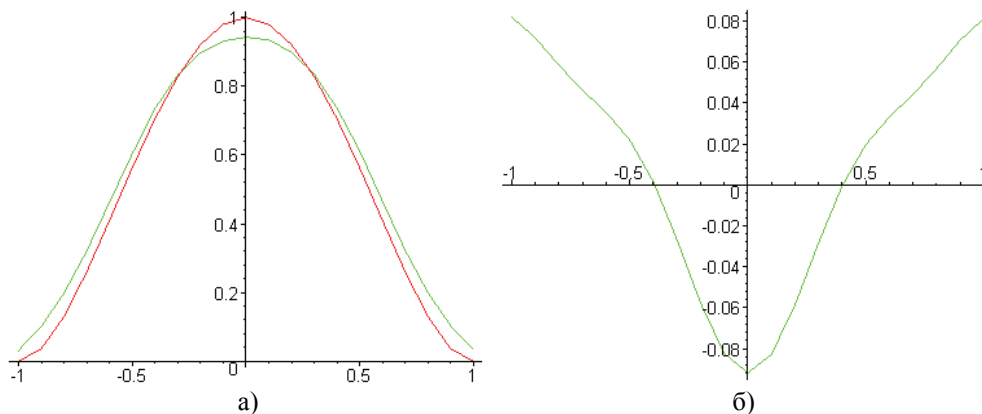


Рис. 2 Графики точного и приближенного решения уравнения Галлена:
а – действительная часть решения (максимальная абсолютная погрешность равна 0,069199); б – мнимая часть решения (максимальная абсолютная погрешность равна 0,091782)

5 Границы применимости уравнения Галлена

Как отмечалось во введении, электрический вибратор моделируется цилиндром радиусом a ($a > 0$) и длиной l ($l \gg a$). При этом предполагается, что величина a является конечной. Исследуем, при каких значениях параметра a уравнениями Поклингтона и Галлена можно моделировать электрический вибратор.

Рассмотрим уравнение

$$\int_{-l}^l I_z(z') K(z-z') dz' = f(z), \quad -L \leq z \leq L,$$

где $K(z-z') = \frac{e^{-i\beta\sqrt{(z-z')^2+a^2}}}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}}$.

Предположим, что функция $I_z(z')$ представима в виде тригонометрического полинома

$$I_z(z') = a_0 + \sum_{j=1}^n (a_j \cos jz + b_j \sin jz).$$

Рассмотрим влияние параметра a на возможность такого представления.

Вначале рассмотрим интеграл

$$\int_{-l}^l a_0 K(z-z') dz' = a_0 \int_{-l}^l \frac{\cos \beta \sqrt{(z-z')^2+a^2} + i \sin \beta \sqrt{(z-z')^2+a^2}}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} dz'.$$

Очевидно, интеграл

$$\int_{-l}^l \frac{\sin \beta \sqrt{(z-z')^2+a^2}}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} dz'$$

конечен при любых конечных β и a ($0 \leq a \leq A$).

Поэтому рассмотрим интеграл

$$\int_{-l}^l \frac{\cos \beta \sqrt{(z-z')^2+a^2}}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} dz' = \int_{-l}^l \frac{dz'}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} + \int_{-l}^l \frac{\cos \beta \sqrt{(z-z')^2+a^2} - 1}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} dz'.$$

Нетрудно видеть, что в этом выражении второй интеграл конечен при любых конечных β и a ($0 \leq a \leq A$), а первый интеграл равен

$$\int_{-l}^l \frac{dz'}{\sqrt{(z-z')^2+a^2}} = \ln \left| (z'-z) + \sqrt{(z'-z)^2+a^2} \right| \Big|_{-l}^l = \ln \left| \frac{(l-z) + \sqrt{(l-z)^2+a^2}}{(-l-z) + \sqrt{(-l-z)^2+a^2}} \right|.$$

Из этой формулы можно сделать два вывода: 1) при $a=0$ интеграл не существует в смысле Римана; 2) при $a \rightarrow 0$ интеграл стремится к бесконечно-

сти и вклад, вносимый свободным элементом разложения $I_z(z')$, стремится к бесконечности, что является физически необоснованным.

Таким образом, разложение $I_z(z')$ в ряд Фурье не должно содержать постоянного коэффициента a_0 .

Покажем, что это разложение не должно содержать и косинусов. В самом деле, рассмотрим интеграл

$$\int_{-l}^l \frac{\cos jz' \cos \beta \sqrt{(z-z')^2 + a^2}}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz' = \int_{-l}^l \frac{\cos \beta \sqrt{(z-z')^2 + a^2}}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz' + \\ + \int_{-l}^l \frac{(\cos jz' - 1) \cos \beta \sqrt{(z-z')^2 + a^2}}{\sqrt{(z-z')^2 + a^2}} dz' = J_1 + J_2,$$

где $j = 1, 2, \dots$

Нетрудно видеть, что интеграл J_2 при $a \rightarrow 0$ существует как несобственный интеграл Римана, а интеграл J_1 , как было показано выше, стремится к бесконечности при $a \rightarrow 0$.

Следовательно, предельный переход к $a = 0$ в уравнении Галлена невозможен, если хотя бы один коэффициент a_j в разложении функции тока в ряд Фурье отличен от нуля. Требование, чтобы $a_j = 0$ при всех $j = 0, 1, \dots$, противоречит физической постановке задачи, т.к. в этом случае $I_z(0) = 0$, что невозможно.

Таким образом, уравнение Поклингтона и Галлена не моделируют электрический вибратор при очень малых значениях a .

6 Гиперсингулярные интегральные уравнения теории электрических вибраторов

Приемлемым с математической точки зрения обобщением уравнений Поклингтона и Галлена, при очень малых значениях параметра a , является использование гиперсингулярных интегралов при $a = 0$.

Замечание. Мы подчеркиваем, что предлагаемое ниже обобщение получено как математическое обобщение, а не из уравнений Максвелла.

Рассмотрим вначале уравнение Поклингтона:

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + \beta^2 \right) \int_{-l}^l I_z(z') G(z-z') dz' = f(z), \quad -L \leq z \leq L. \quad (17)$$

Полагая $a = 0$ и понимая интеграл (17) в смысле Адамара, приходим к гиперсингулярному интегральному уравнению

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + \beta^2 \right) \int_{-l}^l I_z(z') G^*(z-z') dz' = f(z), \quad -L \leq z \leq L, \quad (18)$$

где $G^*(z) = \frac{e^{-i\beta|z|}}{4\pi|z|}$.

Для решения уравнения (18) используем следующие приближенные методы.

Первый метод. Будем рассматривать уравнение (19) при $-L \leq z \leq L$, где значение L определяется из условия $f(\pm L) = 0$. Обозначим через $U(z)$ интеграл

$$U(z) = \int_{-l}^l I_z(z') G^*(z - z') dz'$$

и рассмотрим краевую задачу

$$\frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} + \beta^2 U(z) = f(z) \quad (19)$$

при условиях

$$U(-L) = U(L) = 0. \quad (20)$$

Решив краевую задачу (19), (20) методом вариации, приходим к интегральному уравнению первого рода

$$\int_{-l}^l I_z(z') G^*(z - z') dz' = g(z), \quad -L \leq z \leq L, \quad (21)$$

где $g(z)$ – решение краевой задачи (19), (20).

Уравнение (21) будем решать методом коллокации. Введем три системы узлов $t_k = -l + 2kl/N$, $k = 0, 1, \dots, N$; $\bar{t}_k = t_k + l/N$, $k = 0, 1, \dots, N-1$; $\tau_k = -L + 2kL/N + L/N$, $k = 0, 1, \dots, N-1$.

Приближенное решение будем искать в виде сплайна

$$x_N(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \psi_k(t),$$

$$\text{где } \psi_k(t) = \begin{cases} 0, & -l \leq t \leq \bar{t}_{k-1}, \bar{t}_{k+1} \leq t \leq l, \\ \frac{t - \bar{t}_{k-1}}{\bar{t}_k - \bar{t}_{k-1}}, & \bar{t}_{k-1} < t < \bar{t}_k, \\ \frac{t - \bar{t}_{k+1}}{\bar{t}_k - \bar{t}_{k+1}}, & \bar{t}_k < t < \bar{t}_{k+1}; \end{cases} \quad \psi_0(t) = \begin{cases} 0, & \bar{t}_1 \leq t \leq l, \\ \frac{t - t_0}{\bar{t}_0 - t_0}, & t_0 < t < \bar{t}_0, \\ \frac{t - \bar{t}_1}{\bar{t}_0 - \bar{t}_1}, & \bar{t}_0 < t < \bar{t}_1; \end{cases}$$

$$\psi_{N-1}(t) = \begin{cases} 0, & -l \leq t \leq \bar{t}_{N-2}, \\ \frac{t - \bar{t}_{N-2}}{\bar{t}_{N-1} - \bar{t}_{N-2}}, & \bar{t}_{N-2} < t < \bar{t}_{N-1}, \\ \frac{t - t_N}{\bar{t}_{N-1} - t_N}, & \bar{t}_{N-1} < t < t_N, \end{cases}$$

значения $x_k(t)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, которого определяются из системы уравнений

$$\int_{-l}^l x_N(\tau) G^*(\tau_k - \tau) d\tau = g(\tau_k), k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (22)$$

Можно показать, что система уравнений (22) имеет единственное решение $x_N^*(t)$. Это решение является решением исходного уравнения (18) при условиях (20). Отметим, что приближенное решение $x_N(t)$ уравнения (22) ищется в форме, удовлетворяющей условию $x_N(\pm l) = 0$, т.е. выполнено условие равенства нулю тока на концах стержня.

Результаты решения уравнения (21) изложенным выше методом коллокации представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты решения уравнения (21) методом коллокаций

N	Абсолютная погрешность	
	$\max \left \operatorname{Re} \left[I_z(z') - x_N^*(z') \right] \right $	$\max \left \operatorname{Im} \left[I_z(z') - x_N^*(z') \right] \right $
40	0,144714	0,107293
80	0,111523	0,038606
120	0,074564	0,062448
160	0,061126	0,022025

Примечание. Значения параметров были выбраны следующими: $I_z(z') = 1$; $\beta = 12$; $l = 1$; $L = 1$; N – число узлов коллокаций.

Второй метод. Обозначим через $K(z)$ следующую функцию:

$$K(z) = \begin{cases} 1, & \text{при } z \in (-l, l), \\ 0, & \text{при } z \in (-\infty, \infty) \setminus (-l, l). \end{cases}$$

Тогда уравнение (18) можно представить в виде

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + \beta^2 \right) \int_{-\infty}^{\infty} K(z') I_z(z') G^*(z - z') dz' = \bar{f}(z), \quad -L \leq z \leq L, \quad (23)$$

$$\text{где } \bar{f}(z) = \begin{cases} f(z), & \text{при } z \in (-L, L), \\ 0, & \text{при } z \in (-\infty, \infty) \setminus (-L, L). \end{cases}$$

Применяя к уравнению (23) преобразование Фурье, приходим к уравнению в свертках

$$(-\omega^2 + \beta^2) \bar{G}^*(\omega) U(\omega) = \bar{F}(\omega), \quad (24)$$

где $\bar{G}^*(\omega)$, $U(\omega)$, $\bar{F}(\omega)$ – преобразования Фурье функций $G^*(z)$, $K(z)I_z(z)$, $\bar{f}(z)$. Отметим, что преобразование $\bar{G}^*(\omega)$ функции $G^*(z)$ определяется, как преобразование обобщенной функции [8].

Аналогичные рассуждения проведем для уравнения Галлена, которое для простоты обозначений запишем в виде

$$\int_{-l}^l I_z(z') \left[\frac{\partial^2 G(z-z')}{\partial z^2} + \beta^2 G(z-z') \right] dz' = f(z), \quad -L \leq z \leq L. \quad (25)$$

Ядро уравнения (25) можно представить в виде

$$\frac{\partial^2 G(z)}{\partial z^2} + \beta^2 G(z) = \frac{e^{-i\beta\sqrt{z^2+a^2}}}{4\pi} \left[\frac{3i\beta z^2}{(z^2+a^2)^2} - \frac{i\beta}{z^2+a^2} - \frac{\beta^2 z^2}{(z^2+a^2)^{3/2}} - \frac{1}{(z^2+a^2)^{3/2}} + \frac{3z^2}{(z^2+a^2)^{5/2}} + \frac{\beta^2}{(z^2+a^2)^{1/2}} \right].$$

Полагая в данном ядре параметр a равным нулю, приходим к следующему гиперсингулярному интегральному уравнению:

$$\int_{-l}^l I_z(z') \frac{e^{-i\beta|z|}}{4\pi} \left[\frac{2i\beta}{z^2} + \frac{2}{|z|^3} \right] dz' = f(z), \quad -L \leq z \leq L.$$

Таким образом, получено гиперсингулярное интегральное уравнение с особенностью третьего порядка, для решения которого используются численные методы, описанные выше для приближенного решения гиперсингулярного интегрального уравнения Поклингтона.

Список литературы

1. **Сазонов, Д. М.** Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. – М. : Высшая школа, 1988. – 434 с.
2. **Неганов, В. А.** Сингулярные интегральные уравнения как метод физической регуляризации некорректных электродинамических задач радиотехники и связи / В. А. Неганов // Успехи современной радиотехники. – 2005. – № 12. – С. 16–24.
3. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1986. – 244 с.
4. **Адамар, Ж.** Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа / Ж. Адамар. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
5. **Чикин, Л. А.** Особые случаи краевой задачи Римана и сингулярные интегральные уравнения / Л. А. Чикин // Ученые записки Казанского государственного университета. – 1953. – Т. 113. – № 10. – С. 53–105.
6. **Люстерник, Л. А.** Элементы функционального анализа / Л. А. Люстерник, В. И. Соболев. – М. : Наука, 1965. – 520 с.
7. **Обломская, Л. Я.** О методах последовательных приближений для линейных уравнений в банаховых пространствах / Л. Я. Обломская // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1968. – Т. 8. – № 2. – С. 417–426.
8. **Гельфанд, И. М.** Обобщенные функции и действия над ними / И. М. Гельфанд, Г. Е. Шилов. – М. : Добросвет, 2000. – 412 с.

О. В. Башкиров, П. П. Першенков, Е. А. Тюрин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ МЕТОДОМ «ТРЕХ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИГНАЛА»

Рассматриваются вопросы измерения частоты сетевого напряжения по трем мгновенным значениям при наличии высших гармоник. Построена модель измерения частоты сетевого напряжения в системе MathLab. Сделаны выводы о возможности применения метода на практике.

В состав устройств измерения параметров показателей качества электросети (ПКЭ) согласно ГОСТ 13109–97 [1] должно входить устройство измерения частоты электросети. Погрешность измерения частоты является составляющей погрешности приборов измерения ПКЭ, адаптируемых к периоду сигнала. Поэтому задача повышения быстродействия и точности измерения частоты непосредственно связана с задачей повышения быстродействия и точности измерения параметров ПКЭ электросети.

Обзор существующих цифровых методов измерения частоты показал отсутствие единого метода измерения частоты электросети [2]. В каждом приборе реализован свой «собственный» метод измерения. В данной статье предлагается для измерения частоты электросети использовать метод на основе обработки трех мгновенных значения сигнала (ТМЗС).

Как известно [3, 4], при равномерной дискретизации во времени гармонического сигнала $u(t)$ с шагом h для определения его параметров достаточно использовать только три мгновенных значения (u_0, u_1, u_2) , т.к. остальные мгновенные значения выражаются через три рядом стоящие [4].

Тогда круговая частота гармонического сигнала вычисляется по выражению

$$\omega = \frac{1}{h} \arccos \left(\frac{u_0 + u_2}{2u_1} \right), \quad (1)$$

где $(u_0 + u_2)/2u_1 = \cos(\omega h)$ – расстояние между двумя мгновенными значениями в угловой мере для данной частоты ω .

Частота ω гармонического сигнала определяется по трем мгновенным значениям u_0, u_1, u_2 неоднозначно (функция $\arccos$ является многозначной), но в случае $h < T/2$ частота ω определяется однозначно, т.к. в этом случае $\varphi = \omega h$ является главным значением $\arccos$.

В работе [4] отмечено, что при использовании уравнения (1) необходимо исключить области мгновенных значений $u_1 = 0$ (т.е. когда u_1 попадает в нуль-переход, тогда u_0 и u_2 имеют противоположные знаки) согласно условию

$$|2u_i| \neq |u_{i-1} + u_{i+1}|,$$

так как в этом случае ω не определена.

Рассмотрим возможность применения описанного выше метода для измерения частоты электросети при наличии в ней высших гармоник, что имеет место в реальных электросетях.

Методики определения погрешности измерения от наличия в сигнале гармоник даны в работе [5]. Используя (1), получаем выражение для определения частоты гармонического сигнала при наличии в нем высших гармоник:

$$\omega^* = \frac{1}{h} \arccos \left(\frac{\left(\cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=1}^v K_{U(n)} \cos(\omega n t + \varphi_n) \right)}{2 \left(\cos(\omega(t+h) + \varphi_1) + \sum_{n=1}^v K_{U(n)} \cos(\omega n(t+h) + \varphi_n) \right)} + \right. \\ \left. + \frac{\left(\cos(\omega(t+2h) + \varphi_1) + \sum_{n=1}^v K_{U(n)} \cos(\omega n(t+2h) + \varphi_n) \right)}{2 \left(\cos(\omega(t+h) + \varphi_1) + \sum_{n=1}^v K_{U(n)} \cos(\omega n(t+h) + \varphi_n) \right)} \right), \quad (2)$$

где $K_{U(n)} = \frac{U_{mn}}{U_{m1}}$ – коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;

φ_1 – начальная фазы первой гармоники; φ_n – начальная фаза n -й гармоники.

То же, но без высших гармоник:

$$\omega = \frac{1}{h} \arccos \left(\frac{\cos(\omega t + \varphi_1) + \cos(\omega(t+2h) + \varphi_1)}{2 \cos(\omega(t+h) + \varphi_1)} \right). \quad (3)$$

Абсолютная и относительная погрешности определения частоты, обусловленные наличием высших гармоник, соответственно равны

$$\Delta\omega = \omega^* - \omega; \\ \delta_\omega = \frac{\Delta\omega}{\omega}. \quad (4)$$

Отметим, что, в отличие от выражения (1), выражение (2) содержит значение начальной фазы гармоник φ_n , потому как ожидается, что при наличии высших гармоник измеренное значение частоты по методу ТМЗС будет зависеть от начальной фазы.

Исследование точности определения частоты электросети при наличии высших гармоник тока и напряжения проводилось с использованием математического пакета MathCad.

Для упрощения расчетов брались только значения первых десяти гармоник. Коэффициенты n -х гармоник соответствуют данным ГОСТ 13109–97 [1] для линейного напряжения 380 В, т.к. при данном номинале напряжения коэффициенты гармоник имеют наибольшее значение, что позволит оценить максимальное значение погрешности. Начальные фазы гармоник напряжения взяты в произвольном порядке.

На рис. 1 показан сетевой сигнал с амплитудой $U = 380\sqrt{2}$ В при наличии в нем девяти высших гармоник.

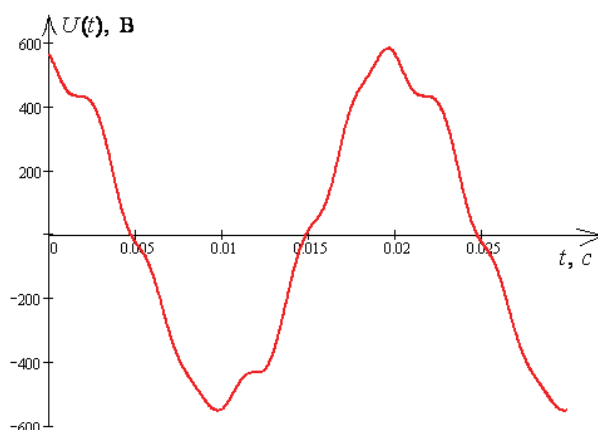


Рис. 1 Сигнал электросети при наличии в нем несинусоидальных искажений

На рис. 2 в соответствии с выражением (2) показан график зависимости результатов измерения частоты от начальной фазы φ_1 и шага дискретизации h . Из которого следует нецелесообразность использования метода ТМЗС для измерения частоты сигнала при наличии в нем высших гармоник. Рассмотрим возможность применения метода ТМЗС в случае подавления высших гармоник цифровым фильтром.

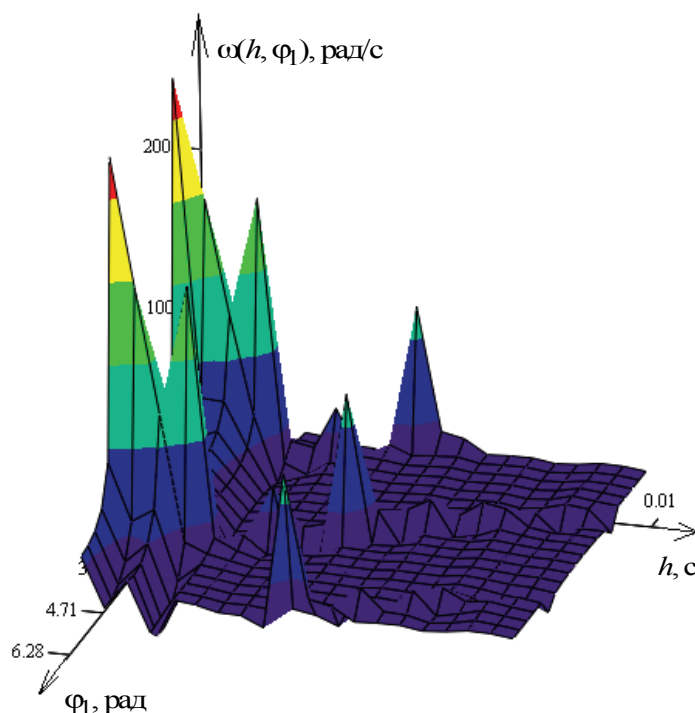


Рис. 2 Зависимость угловой частоты от начальной фазы сигнала и шага дискретизации при наличии в сигнале несинусоидальных искажений

В идеальном случае фильтр нижних частот (ФНЧ) должен подавлять все гармоники выше первой. С учетом предположения, что частота основной гармоники для проектируемой системы изменяется в пределе от 45 до 55 Гц, и с учетом того, что частота дискретизации выбрана $f_s = 1$ кГц (здесь выбор частоты дискретизации не рассматривается), фильтр должен иметь следующие параметры:

- полоса пропускания от 0 до 55 Гц;
- полоса подавления $90 \leq f \leq f_s / 2$.

Как показал обзор современных средств измерения [2], достаточным и обоснованным является применение 12-разрядного АЦП.

Для измерения частоты основной гармоники методом ТМЗС в системе MathLab разработана модель, показанная на рис. 3. Блок «Istochnic» моделирует гармонический сигнал, содержащий высшие гармоники до 10-й включительно. Амплитуды гармоник соответствуют ГОСТ 13109–97 [1], начальные фазы гармоник выбраны в произвольном порядке. Блок «discrete» моделирует АЦП 12-го порядка с частотой дискретизации 1 кГц.

Блоки «Delay» осуществляют задержку на заданное число отсчетов, что необходимо для измерения частоты, т.е. данные блоки обеспечивают выбор трех мгновенных значений.

Блок «datchik» (рис. 4) контролирует переход измеряемого сигнала через ноль. Блоки «If» фиксируют моменты, когда $u_1 = u_3$ (при этом $u_2 = 0$), и отбрасывает соответствующие дискретные значения.

«Blok izmereniю» содержит функцию расчета частоты основной гармоники по трем мгновенным значениям согласно выражению (2).

Блок «Frequency» выводит результат измерения частоты основной гармоники.

Блок «Error Function» необходим для вычисления относительной погрешности измерения частоты основной гармоники в соответствии с (4). Результат измерения выводится в блок «Error».

Блок «Scope 1» совмещает блоки «Error Function» и «Error».

Построение различных цифровых фильтров в системе MathLab выполняется с помощью среды проектирования фильтров «Digital Filter Design». В качестве НЧ-фильтра будем рассматривать только КИХ-фильтры, поскольку они, как известно, имеют меньшую временную задержку. Проектирование КИХ-фильтра осуществим методом «Equiripple», заложенным в систему MathLab. Данный метод позволяет создать фильтр по заданным параметрам (см. выше) при этом его порядок окажется минимально возможным. На рис. 5 представлена АЧХ спроектированного КИХ-фильтра 96-го порядка.

Осциллограмма измеренного значения частоты основной гармоники и относительная погрешность метода при выбранных параметрах ФНЧ представлены на рис. 6. Блок «Istochnic» моделирует полигармонический сигнал с начальной фазой первой гармоники равной 0^0 . Здесь на оси абсцисс – время измерения в секундах, по оси ординат – измеренное значение частоты (Гц) в верхней части осциллограммы, в нижней – относительная погрешность измерения (%). Как видим (рис. 6), метод позволяет измерить частоту электро-сети с малым значением относительной погрешности.

На рис. 7 показана зависимость относительной погрешности измерения частоты от начальной фазы основной гармоники. Из графика видно, что хотя зависимость и существует, однако при выбранных параметрах относительная погрешность не превышает 0,7 %.

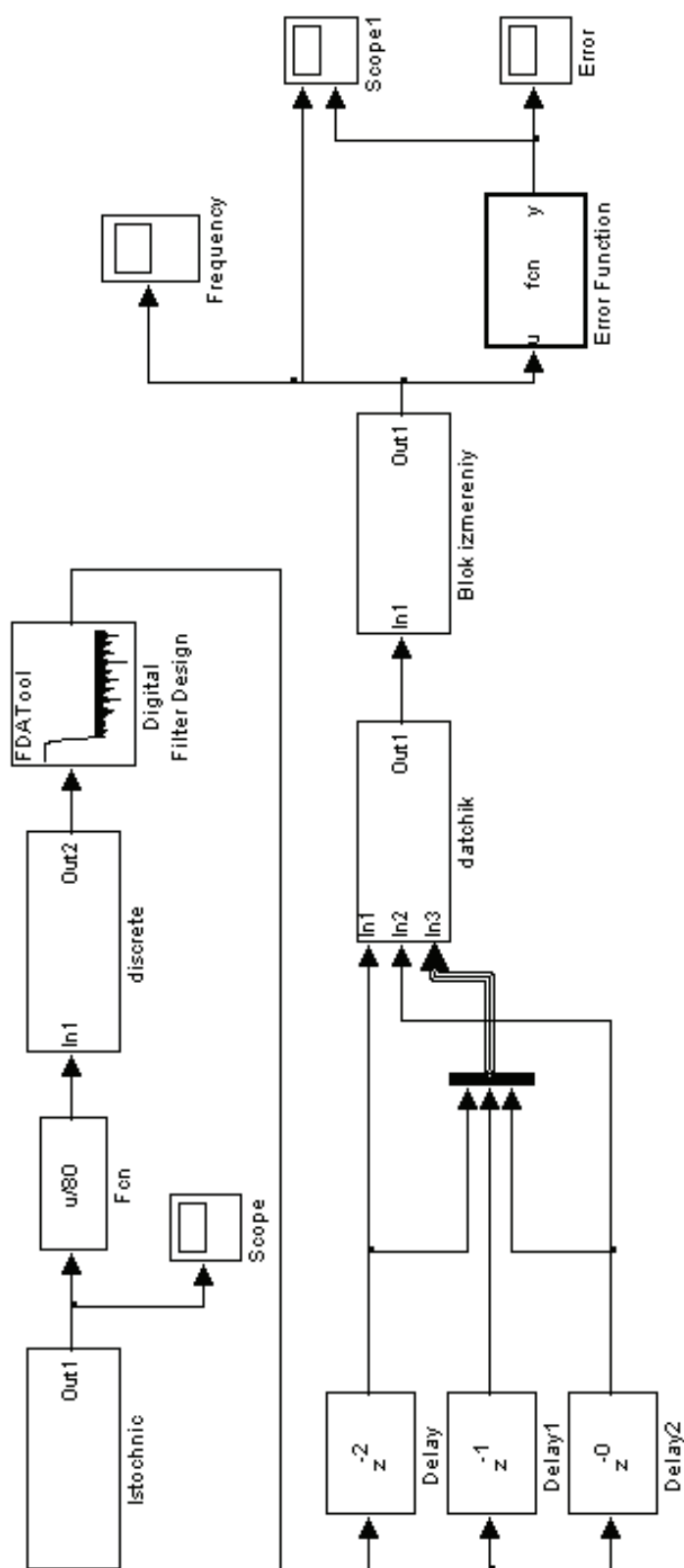


Рис. 3 Модель измерения частоты основной гармоники методом ТМЗС

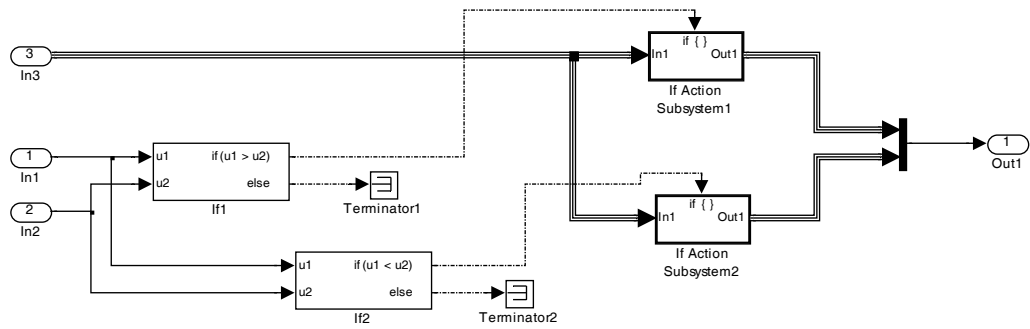


Рис. 4 Внутренняя структура блока «datchik»

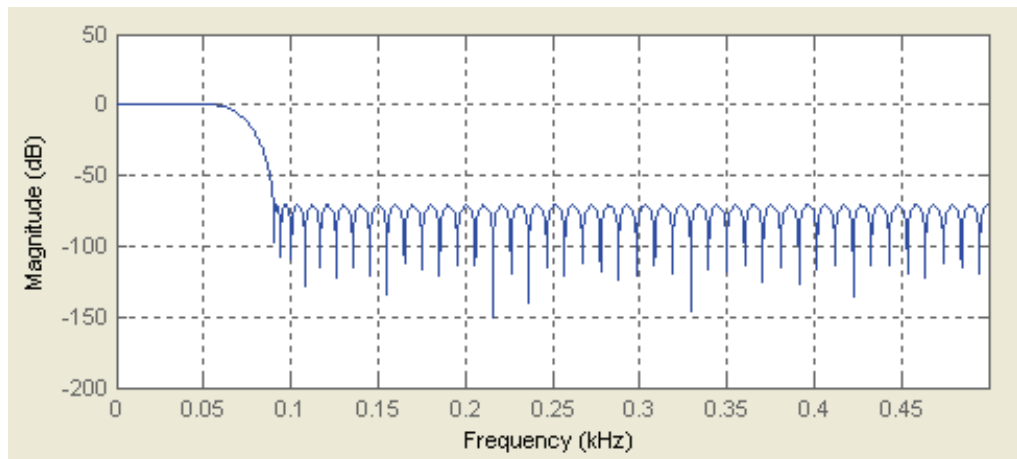


Рис. 5 АЧХ КИХ-фильтра 96-го порядка

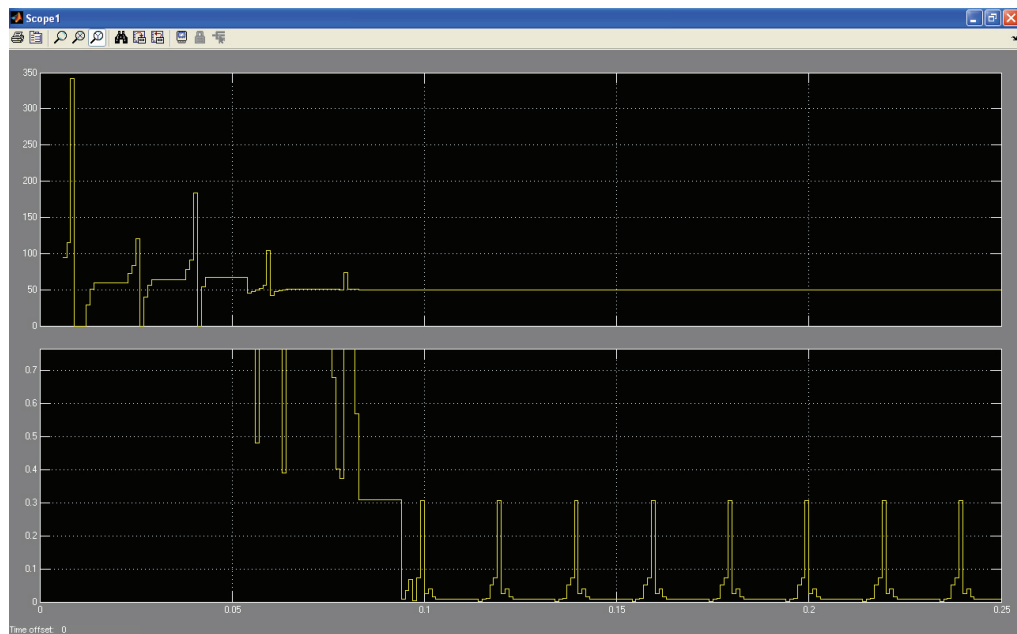


Рис. 6 Осциллограмма измеренного значения частоты основной гармоники и относительной погрешности метода

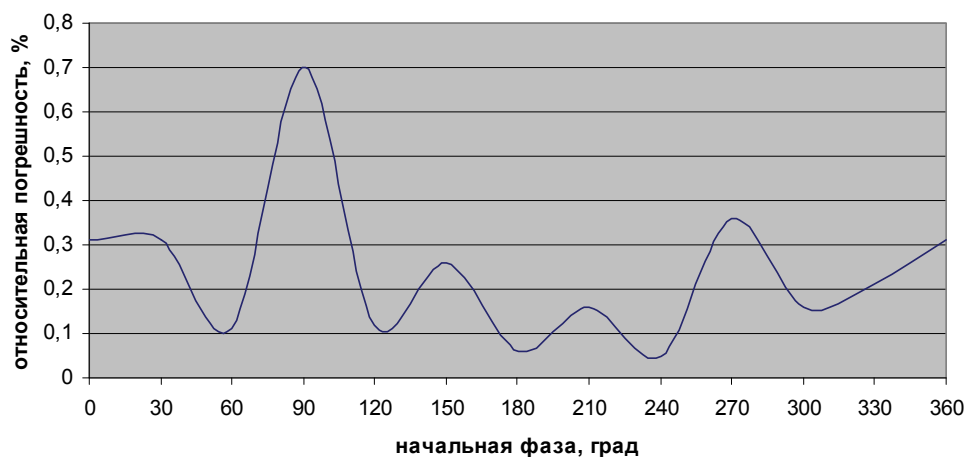


Рис. 7 Зависимость относительной погрешности измерения частоты от начальной фазы основной гармоники

Из приведенного точечного графика (рис. 8) следует, что с увеличением интервала выборки дискретных значений относительная погрешность измерения частоты основной гармоники уменьшается.

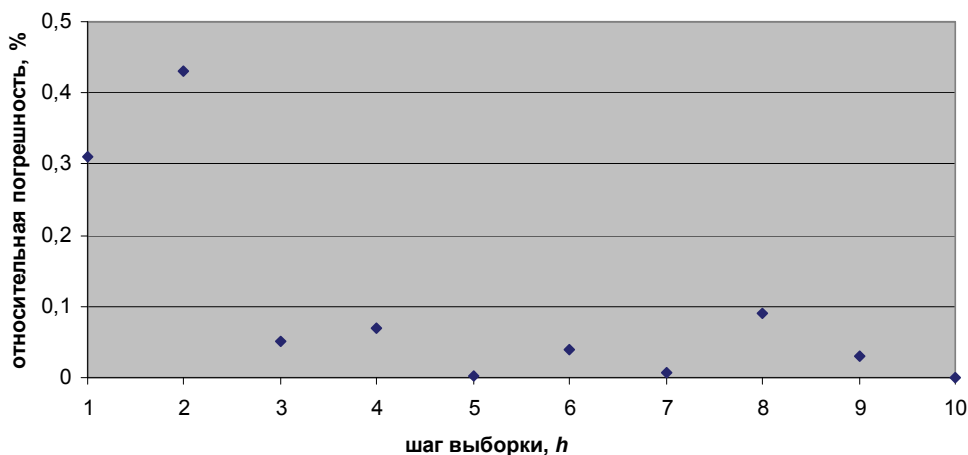


Рис. 8 Зависимость относительной погрешности измерения частоты от шага выборки дискретных значений

При уменьшении порядка фильтра следует ожидать уменьшение времени измерения. Соответственно непременно увеличится и относительная погрешность. На рис. 9 показана осциллограмма измеренного значения частоты основной гармоники. Для подавления высших гармоник использован КИХ-фильтр 18 порядка, спроектированный по методу «наименьших квадратов» [6]. Интервал выборки дискретных значений $h = 3$, т.к. при данном значении наблюдается резкое снижение относительной погрешности, а при больших шагах увеличивается время измерения. Частота дискретизации осталась прежней и равна 1 кГц. По осциллограмме (рис. 9) видно, что в этом случае относительная погрешность измерения частоты не превышает 1 %, а время измерения равно одному периоду (0,02 с) основной гармоники.

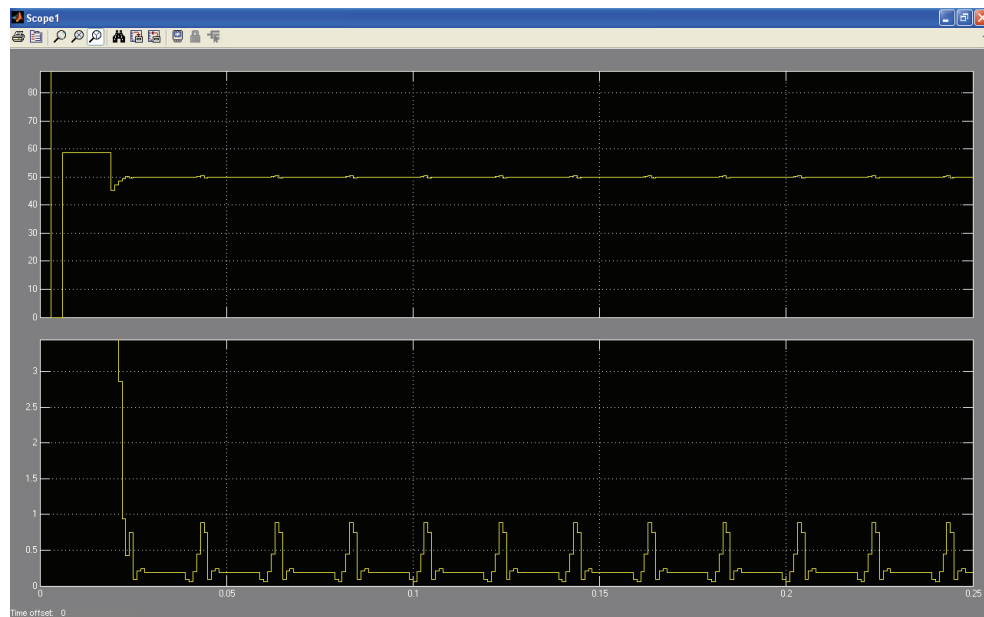


Рис. 9 Осциллограмма измеренного значения частоты основной гармоники и относительной погрешности метода при использовании КИХ-фильтра, спроектированного по методу «наименьших квадратов»

Заключение

В результате проведенного исследования возможности применения метода ТМЗС для измерения частоты электросети установлено: нецелесообразно применять метод для измерения частоты электросети при наличии в сигнале высших гармоник без предварительной фильтрации измеряемого сигнала.

На примере модели (рис. 3) измерения частоты с использованием КИХ-фильтра «Equiripple» показана принципиальная возможность использования метода ТМЗС для измерения частоты электросети с относительно высокой точностью. Установлена зависимость относительной погрешности измерения от начальной фазы основной гармоники и шага выборки дискретных значений. Обосновано, что при уменьшении порядка фильтра и, соответственно, уменьшении затухания в полосе задержания фильтра возможно уменьшить время измерения (временную задержку фильтра). Однако при этом также стоит ожидать и увеличения значений относительной погрешности, что показано на примере с использованием КИХ-фильтра, спроектированного по методу «наименьших квадратов». В этом случае относительная погрешность не превысила 1 %, а время измерения составило один период измеряемой гармоники.

Поэтому при использовании цифровых ФНЧ возможно применение метода ТМЗС для измерения частоты электросети наряду с другими известными методами.

Список литературы

1. ГОСТ 13109–97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
2. **Михалин, С. Н.** Система автоматического контроля и учета количества электроэнергии : дис. ... к.т.н. / С. Н. Михалин. – М., 2005.

3. **Мешков, В. П.** Определение параметров гармонических сигналов по минимуму мгновенных отсчетов. – ПРЕПРИНТ ИФСО – 262 Ф. / В. П. Мешков, В. Н. Угольников. – Красноярск : Ин-т физики СО АН СССР, 1984. – 7 с.
4. **Мешков, В. П.** Методы измерения амплитуды гармонического сигнала за время менее периода / В. П. Мешков, В. Н. Угольников // Метрология. – 1984. – № 8. – С. 8–11.
5. **Горлач, А. А.** Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А. А. Горлач. – Киев, 1985.
6. **Айфичер, Э.** Цифровая обработка сигналов. Практический подход / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М. ; СПб. ; Киев, 2004.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРАЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ В КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассматриваются вопросы построения комплексных систем безопасности. Предлагаются формализованные методы поиска и построения интеграционных связей подсистем комплексной системы безопасности согласно критерию максимальной эффективности комплексной системы безопасности. Приведены примеры использования предложенных методов.

Введение

Интегрированная, или комплексная, система безопасности (КСБ) объединяет на программно-аппаратном уровне подсистемы безопасности различного функционального назначения, такие как система охранной сигнализации, система пожарной сигнализации, система контроля и управления доступом, система охранного телевидения [1].

В настоящее время существует устойчивая потребность в построении КСБ на базе систем различных производителей. Однако отсутствие единого стандарта интеграции систем безопасности, признаваемого и используемого всеми производителями КСБ, ориентированность большинства разработчиков КСБ на собственные программно-технические решения, отсутствие формализованных методов, позволяющих производить поиск и построение оптимальных интеграционных связей подсистем КСБ согласно критерию максимальной эффективности КСБ, не позволяют эффективно интегрировать системы безопасности различных производителей.

В статье предлагается формализованный подход к решению задачи поиска и построения интеграционных связей подсистем КСБ согласно критерию максимальной эффективности КСБ.

1 Модель интегрируемой системы

Исследуем закономерности интеграции разнородных систем.

Известно, что *система* есть совокупность или множество связанных между собой элементов (сущностей), образующих целостность [2]. Под *элементами* будем понимать полезную, с точки зрения системы, информацию или ресурс, которыми система способна оперировать и которые можно получить или передать в систему. Совместимые элементы системы могут объединяться и функционировать внутри *компонент*, объединенных в свою очередь для достижения определенной цели. В рамках компонент элементы могут создаваться, уничтожаться, обрабатываться, развиваться, храниться, функционировать и передаваться. Иначе говоря, элементы «понятны» «своим» компонентам. На рис. 1 изображена система А, образованная двумя компонентами, «понимающими» соответственно элементы типа «овал» и «многоугольник».

В качестве примера можно привести систему охранного телевидения, где элементами являются изображения, получаемые видеокамерами, а компонентами являются экраны мониторов или программные «окна», на которые выводятся эти изображения, а также камеры, осуществляющие преобразование изображений в электрический сигнал.

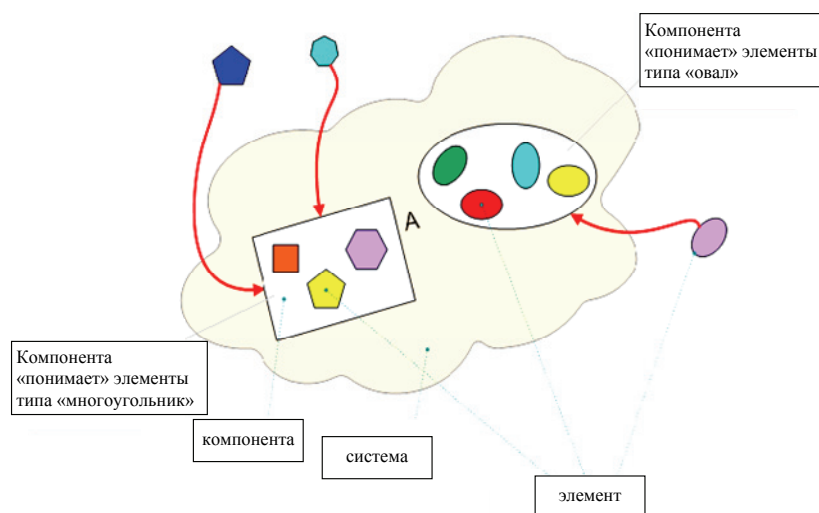


Рис. 1 Модель интегрируемой системы

2 Два общих метода интеграции систем

Пусть даны две интегрируемые системы: A и B . В общем случае системы A и B «не понимают» друг друга вследствие того, что элементы, которыми они оперируют, разные.

Первый метод, разрешающий проблему стыковки систем, состоит в следующем. Необходимо найти способ *приведения* (преобразования) элемента системы B к элементу системы A , чтобы этот элемент был «понятен» системе A (рис. 2).

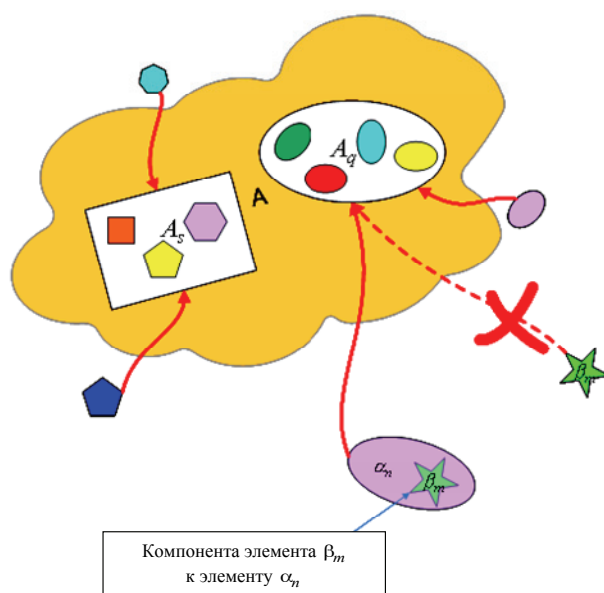


Рис. 2 Приведение элемента β_m к элементу α_n для «понимания» ее компонентой A_q

Применение данного метода к элементам системы B приведет к тому, что элементы системы B станут «понятны» системе A . Назовем указанный метод «приведение элементов».

«Приведение» элемента подразумевает некоторое его преобразование из одного вида в другой, что в ряде случаев может повлечь за собой потерю информации и иногда существенную. Приведем пример. Дана система A , «понимающая» элементы «НОРМА», «МАЛО», «МНОГО», и система B , «понимающая» множество шестнадцатеричных значений. Приведение элемента системы B к элементу системы A приводит к уменьшению мощности множества значений элемента системы B с 2^{16} до 3. Обратное преобразование элемента при этом невозможно.

Однако, как быть с элементами, когда такие потери информации недопустимы? Решение, очевидно, состоит в следующем. Необходимо *внедрить* в систему A компоненту системы B , «понимающую» «непонятные» для системы A элементы. Назовем этот метод «внедрение компонент». При таком подходе элементы, передаваемые из системы B в систему A , не изменяются, и последняя начинает «понимать» элементы системы B (рис. 3).

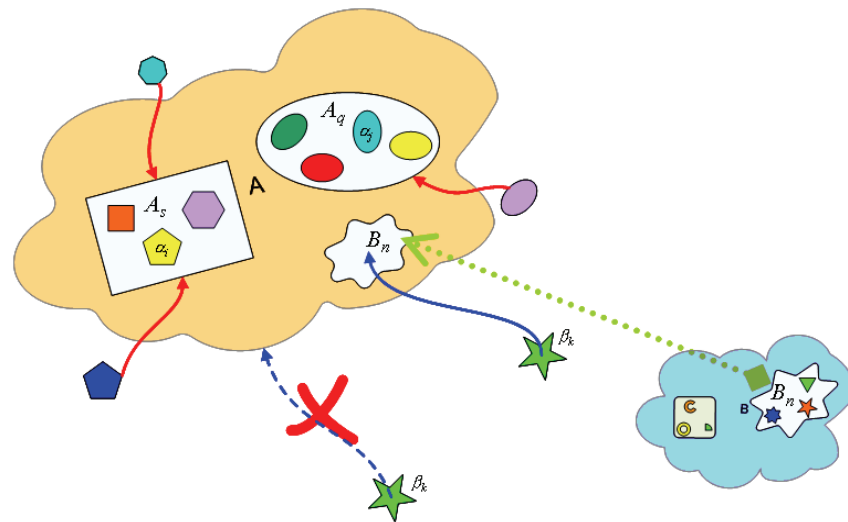


Рис. 3 Внедрение компоненты B_n в систему A

Приведем пример применения метода внедрения компонент. Даны две системы: система охранного телевидения A , в которой элементами являются «ИЗОБРАЖЕНИЕ», и система B , «понимающая» элементы «НОРМА», «МАЛО», «МНОГО». Вполне очевидно, что при применении метода «приведение элементов» для интеграции элементов системы A в систему B будет утеряна полезная информация об изображениях. Применяя метод внедрения компонент, внедрив в систему B компоненту «ЭКРАН», понимающую элемент «ИЗОБРАЖЕНИЕ», можно этого избежать.

Однако прежде чем начать интеграцию, необходимо каким-то образом выделить полезные элементы и компоненты в интегрируемых системах. Далее будет рассмотрен подход к выделению элементов и компонент в подсистемах КСБ, после чего будет предложен метод поиска интеграционных связей в КСБ.

3 Выделение элементов и компонент в КСБ

Каждая из подсистем КСБ в общем случае состоит из двух основных уровней: нижнего – аппаратного, и верхнего – программного [3]. Информа-

ция каждой подсистемы может быть доступна операторам КСБ посредством некоторого человекомашинного интерфейса (HMI – Human-Machine Interface). Связь с остальными подсистемами КСБ осуществляется через программные и аппаратные точки интеграции. Введем обобщенную функциональную модель подсистемы КСБ (рис. 4).

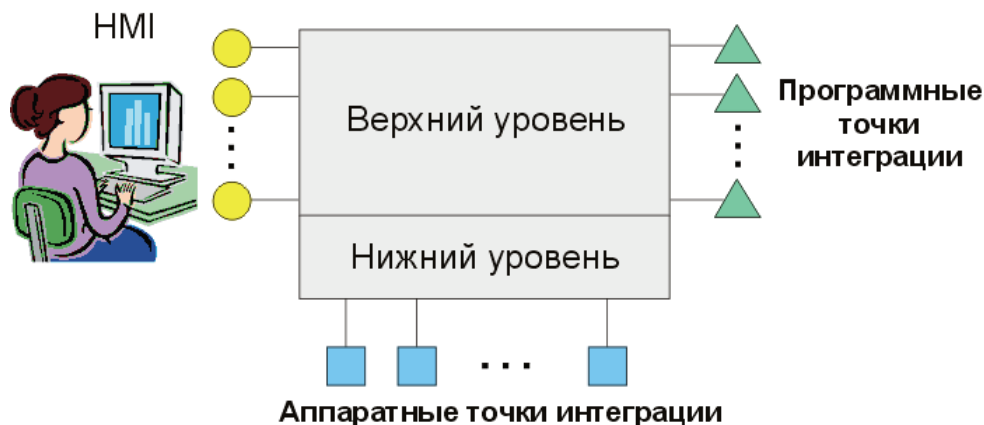


Рис. 4 Обобщенная функциональная модель подсистемы КСБ

Представим каждую подсистему КСБ в соответствии с предложенной обобщенной функциональной моделью. Теперь, чтобы иметь ясное представление о структуре и логических взаимосвязях элементов каждой из подсистем, проведем структурный анализ каждой из подсистем. Воспользуемся для этого диаграммами потоков данных DFD [4]. Таким образом станет понятным, какие именно потоки данных и процессы используются в каждой подсистеме. Полученное для каждой из подсистем множество диаграмм потоков данных определяет функциональную модель каждой подсистемы. Применение структурного анализа, таким образом, позволяет преодолеть сложность комплексной системы безопасности и свести ее структуру к набору простых и понятных для анализа компонент.

Рассмотрим теперь последовательно каждый процесс диаграмм DFD для каждой подсистемы КСБ. Сформируем полный перечень потоков данных, используемых в подсистеме, согласно их типам. Это и есть те полезные сущности, или информация, которой подсистема может оперировать или обмениваться с другими подсистемами. Обозначим соответствующие точки интеграции – пути ввода и вывода сущностей из подсистемы – на верхнем и нижнем уровне КСБ, через которые будет производиться интеграция, выделим соответствующие процессы. Выделенные процессы и есть искомые компоненты.

На рис. 5 приведен пример диаграммы DFD первого уровня системы охранного телевидения с выделенными элементами и компонентами. Пунктирными линиями обозначены потоки данных (элементы), которые могут быть использованы совместно с другими подсистемами. Серым цветом обозначены процессы (компоненты), «понимающие» выделенные элементы.

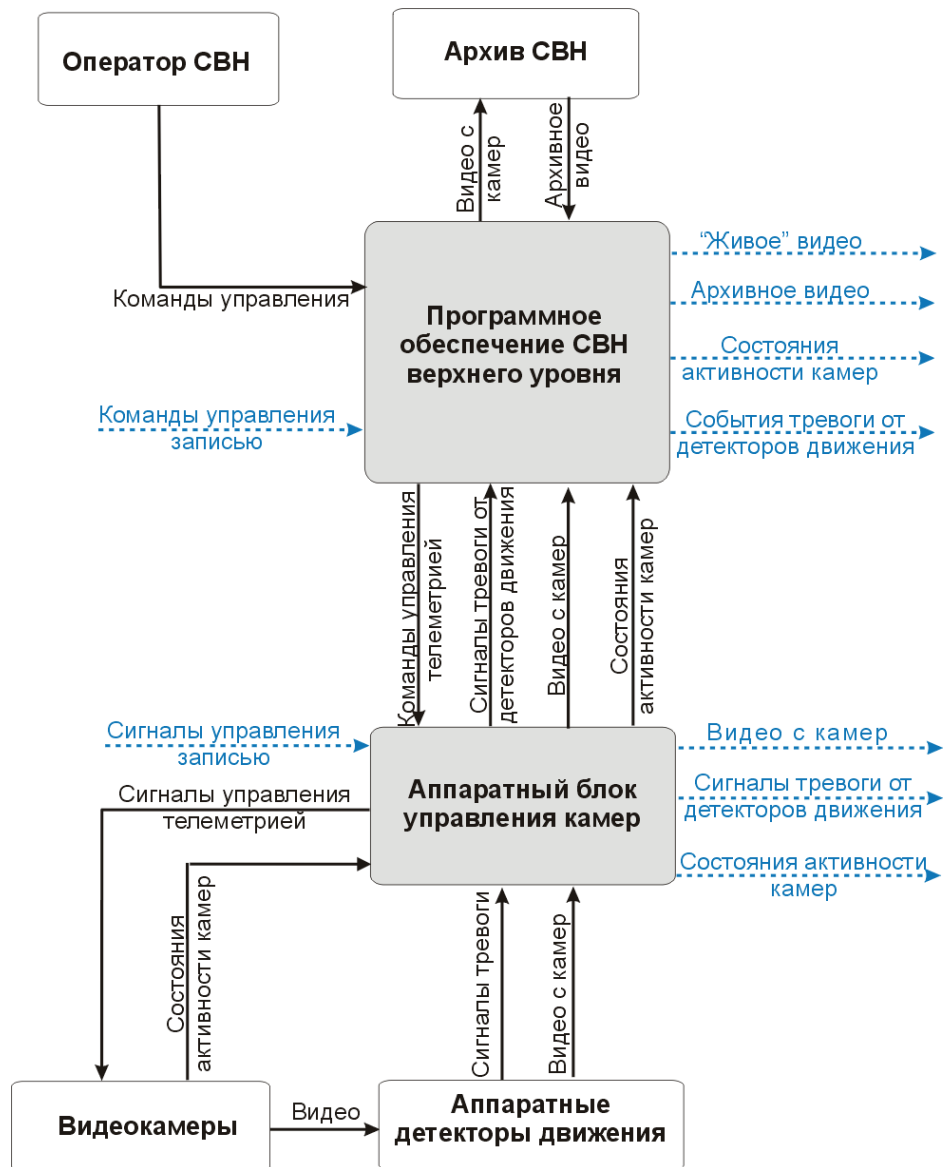


Рис. 5 Пример диаграммы DFD первого уровня подсистемы охранного телевидения с выделенными элементами (потоками данных) и компонентами (процессами)

4 Поиск интеграционных связей подсистем КСБ

Теперь для каждой пары подсистем проведем детальный анализ всех возможных связей. Рассмотрим последовательно каждый из выделенных элементов подсистем и проанализируем, какой из двух предложенных ранее методов интеграции – «приведение элементов» и «внедрение компонент» – можно применить, чтобы передать этот элемент в соседнюю подсистему. В процессе анализа будут отброшены несущественные или не имеющие смысла, с точки зрения функционирования интегрируемых подсистем, связи.

Поскольку количество подсистем, их компонент и элементов конечно, то конечным является возможное число интеграционных связей между под-

системами. Рассчитаем количество возможных связей для случая двух подсистем. Обозначим эти подсистемы соответственно как A и B .

Рассчитаем вначале количество связей между процессом i подсистемы A и процессом j подсистемы B . Пусть:

$M(A_i)$ – число исходящих потоков данных процесса i подсистемы A ;

$M(B_j)$ – число исходящих потоков данных процесса j подсистемы B ;

$N(A_i)$ – число входящих потоков данных процесса i подсистемы A ;

$N(B_j)$ – число входящих потоков данных процесса j подсистемы B .

Методом «приведения элементов» можно преобразовать $M(A_i)N(B_j)$ элементов процесса i в элементы процесса j . Методом «внедрения компонент» можно передать $M(A_i)$ элементов процесса i системы A в процесс j системы B . Тогда количество связей из процесса i системы A в процесс j системы B (обозначим как $W(A_i \rightarrow B_j)$) будет определяться так:

$$W(A_i \rightarrow B_j) = M(A_i)N(B_j) + M(A_i) = M(A_i)(N(B_j) + 1).$$

Количество обратных связей из процесса j системы B в процесс i системы A (обозначим как $W(B_j \rightarrow A_i)$):

$$W(B_j \rightarrow A_i) = M(B_j)(N(A_i) + 1).$$

Общее число связей между процессом i подсистемы A и процессом j подсистемы B (обозначим как $W(A_i \leftrightarrow B_j)$):

$$\begin{aligned} W(A_i \leftrightarrow B_j) &= W(A_i \rightarrow B_j) + W(B_j \rightarrow A_i) = \\ &= M(A_i)(N(B_j) + 1) + M(B_j)(N(A_i) + 1). \end{aligned}$$

Для произвольного числа процессов (компонент) общее число связей между системами A и B (обозначим как $W(A \leftrightarrow B)$):

$$\begin{aligned} W(A \leftrightarrow B) &= \sum_i^{P(A)} \sum_j^{P(B)} W(A_i \leftrightarrow B_j) = \\ &= \sum_i^{P(A)} \sum_j^{P(B)} [M(A_i)(N(B_j) + 1) + M(B_j)(N(A_i) + 1)], \end{aligned}$$

где $P(A)$ – число процессов подсистемы A ; $P(B)$ – число процессов подсистемы B .

5 Оптимальный выбор интеграционных связей

Для решения задачи оптимального выбора связей (согласно критерию максимальной эффективности КСБ) необходимо, прежде всего, определить само понятие «эффективности» КСБ, а также рассмотреть методы, позволяющие производить ее оценку.

Под эффективностью КСБ понимают способность системы противостоять несанкционированным действиям нарушителя в рамках проектной угрозы.

На сегодня существует несколько методических подходов к оценке эффективности КСБ [5]. Рассмотрим следующие из них:

1. Детерминистический подход связан с заданием и последующей проверкой обязательных требований, содержащихся в ведомственных руководящих документах, ТЗ на проектирование, рабочем проекте.

2. Методы многокритериальной оптимизации: основой методов является агрегирование информации о частных показателях качества. Среди них выделяют методы лексикографического упорядочивания, итерационные методы предпочтительного выбора, аксиоматический подход с использованием теории полезности и пр.

3. Методы логико-вероятностного моделирования позволяют получить количественную оценку степени риска и уровня защищенности людей и имущества на охраняемом объекте. Модель функционирования СБ, согласно данному методу, представляется как формализованный сценарий развития опасности.

4. Вероятностно-временной анализ базируется на предположениях о случайности и независимости временных параметров в системе «охрана–нарушитель». Эффективность здесь понимается как вероятность пресечения несанкционированных действий нарушителя. Методы реализуются, как правило, с помощью имитационного моделирования.

Для решения задачи оптимального выбора интеграционных связей, согласно критерию максимума эффективности КСБ, применим метод логико-вероятностного моделирования [6]. Модель функционирования КСБ, согласно данному методу, представляется как формализованный сценарий развития опасности. Сценарий строится в виде графа типа «дерево» и содержит события трех видов: инициирующие, промежуточные, конечное.

Терминальными узлами дерева являются инициирующие события (ИС), для которых можно достоверно оценить вероятность их возникновения. Инициирующие события описывают внешние воздействия на систему (например, несанкционированные действия нарушителя: преодоление периметра объекта, имитация процедуры идентификации на контрольно-пропускном пункте и пр.).

Промежуточные события получаются путем логической комбинации двух или более событий посредством операций:

- конъюнкции событий – событие на выходе наступает только при наличии событий на обоих входах;
- дизъюнкции событий – событие на выходе наступает при наличии хотя бы одного события на одном из входов.

Конечное событие описывает наиболее опасное состояние системы (например, проникновение нарушителя на охраняемый объект).

Под эффективностью КСБ при этом понимается вероятность нахождения системы в безопасном состоянии в рамках построенного сценария развития опасности.

Опишем основные шаги предлагаемого подхода к построению оптимальных интеграционных связей.

Строится сценарий развития опасности для полностью несвязанных подсистем. Вслед за этим производится выбор множества инициирующих событий $\{s_i\}$, оказывающих наибольшее влияние на изменение вероятности конечного события, согласно следующему критерию:

$$P(p_i = p_{i0}) - P(p_i = 0) \geq \varepsilon > 0,$$

где p_i – вероятность i -го ИС; p_{i0} – вероятность i -го ИС в построенном дереве опасности; P – вероятность конечного события; $\varepsilon \in R$ – порог изменения вероятности конечного события.

Для каждой из выявленных ранее интеграционных связей проводится анализ того, каким образом данная связь может повлиять на величину вероятности каждого из выбранных инициирующих событий $\{s_i\}$. В случае, если связь оказывает влияние, этот факт отражается в структуре дерева опасности посредством замены узла соответствующего инициирующего события на некоторую логическую структуру, выходная вероятность которой будет меньше вероятности инициирующего события.

Применение описанных выше действий для каждой интеграционной связи приводит к минимизации вероятности конечного события P , и, как следствие, к максимизации эффективности КСБ (обозначим ее как E), определяемой как $E = 1 - P$.

Итак, суть предложенного подхода к поиску и построению интеграционных связей подсистем КСБ заключается в следующем:

- проводим структурный анализ интегрируемых подсистем, выделяем их потоки данных (элементы) и процессы (компоненты), определяем возможные точки интеграции;
- рассматриваем все возможные связи выходных элементов компонентов одной подсистемы с компонентами другой;
- отбрасываем несущественные или не имеющие смысла связи;
- производим выбор оптимальных интеграционных связей, оказывающих наибольшее влияние на итоговую эффективность КСБ;
- в оставшихся связях определяем способ интеграции – «приведение элементов» или «внедрение компонент».

Таким образом, предложенный подход позволяет строить оптимальные, с точки зрения эффективности функционирования КСБ, интеграционные связи.

6 Примеры интеграционных связей подсистем КСБ

Приведем пример интеграционной связи в КСБ, построенной по методу «приведение элементов». Элемент СОТ «НАЛИЧИЕ ДВИЖЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИИ» приводится к элементу СОС «СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТА ОХРАНЫ». Наличие/отсутствие «ДВИЖЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИИ» есть ТРЕВОГА/НОРМА для элемента СОС «СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТА ОХРАНЫ» (рис. 6).

При таком подходе система СОС может обращаться с детектором движения СОТ как с обычным сигнальным шлейфом или охранным датчиком, не требуя внесения изменений в СОС в процессе интеграции с СОТ. То есть СОС «рассматривает» видеокамеру N как один из своих контроллеров и «видит» ее детектор движения как некий виртуальный сигнальный шлейф (ВШС), с которым она уже умеет работать. Список таких виртуальных сигнальных шлейфов можно продолжить: ВШС оставленных предметов, ВШС отсутствия видеосигнала, ВШС слабого освещения и т.д.

Аналогично можно организовать интеграцию СОС и СКУД в части отслеживания СОС состояния точек доступа СКУД. Внутренние события СКУД преобразуются (приводятся) к виртуальным сигнальным шлейфам доступа, которые будут отображать состояние точки доступа (НОРМА, ТРЕВОГА и т.д.). Точка доступа СКУД может иметь еще, например, ВШС «ПРИНУЖДЕНИЯ», «РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ» и т.д.

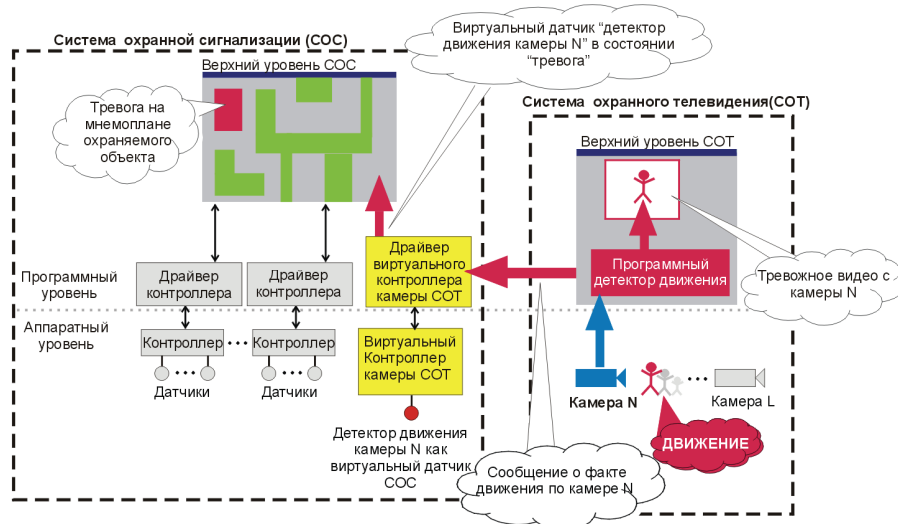


Рис. 6 Пример интеграционной связи в КСБ, построенной по методу «приведение элементов»

Приведем пример интеграционной связи в КСБ, построенной по методу «внедрения компонент». В СОС встраивается компонента СОТ «ЭКРАН», позволяя СОС принимать элементы СОТ «ИЗОБРАЖЕНИЕ» при возникновении состояния тревоги элемента СОС «СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТА ОХРАНЫ» или при просмотре архива тревог (рис. 7).

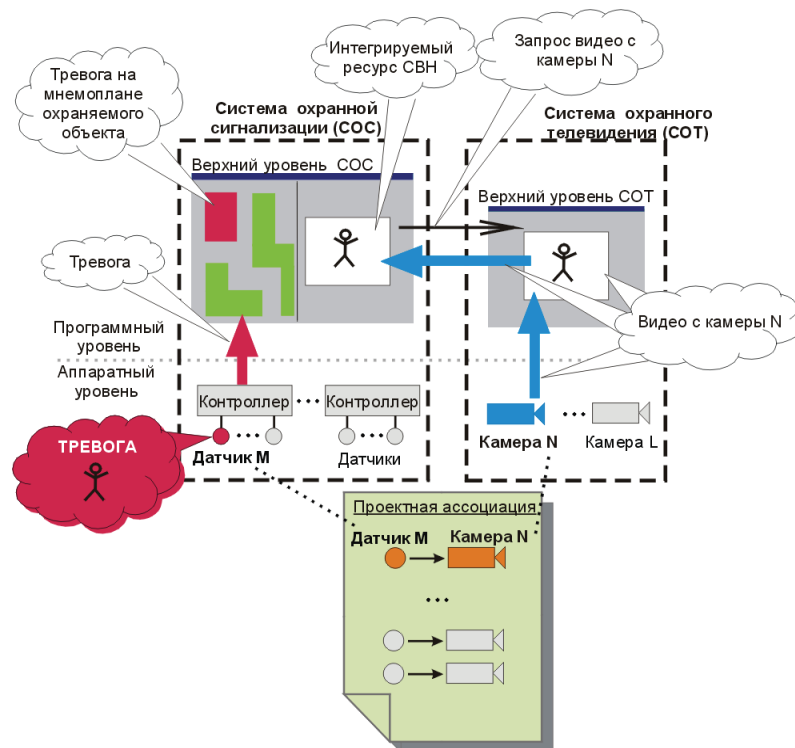


Рис. 7 Пример интеграционной связи в КСБ, построенной по методу «внедрение компонент»

Заключение

Предложены формализованные методы поиска и построения интеграционных связей подсистем КСБ, позволяющие выявлять в КСБ все возможные интеграционные связи между подсистемами, оценивать количество связей, а также производить выбор оптимальных связей согласно критерию максимальной эффективности КСБ.

Предложенный подход позволяет перейти от неформализованного способа построения интеграционных связей, когда связи строятся, исходя из требований заказчика или видения разработчиков КСБ, к формализованному, позволяющему выявить все возможные и оставить лишь оптимальные связи, дающие наибольший положительный вклад в итоговую эффективность КСБ.

Предложенные методы успешно применяются в комплексных системах безопасности, производимых ОАО «Приборный завод «ТЕНЗОР», г. Дубна. Их применение позволило существенно сократить расходы и сроки работ по интеграции подсистем КСБ, внести ясность в сам процесс интеграции.

Список литературы

1. **Барвиненко, С.** Проблема интеграции оборудования различных производителей в единую систему безопасности / С. Барвиненко, Д. Иванов // Безопасность. Достоверность. Информация. – 2007. – № 2. – С. 13–22.
2. **Гиг, Дж.** Прикладная общая теория систем : пер. с англ. / Дж. Гиг. – М. : Мир, 1981. – 336 с.
3. **Генне, О.** Заочная дискуссия об интеграции / О. Генне // Защита информации. Конфидент. – 2000. – № 1.
4. **Калянов, Г. Н.** CASE структурный системный анализ / Г. Н. Калянов. – М. : ЛОРИ, 1996.
5. **Панин, О. А.** Проблемы оценки эффективности функционирования систем физической защиты объектов / О. А. Панин // Безопасность. Достоверность. Информация. – 2007. – № 3.
6. **Панин, О. А.** Логико-вероятностное моделирование в задачах оценки систем физической защиты / О. А. Панин // Безопасность. Достоверность. Информация. – 2008. – № 2.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.746.66.001.57

Н. И. Вайнер, В. Д. Тутарова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВНУТРЕННИХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Рассматриваются причины образования поверхностных дефектов в непрерывнолитых заготовках и возможность их устранения. На основании анализа результатов математического моделирования процесса затвердевания металла делается вывод о целесообразности применения в непрерывной разливке внутренних охладителей различного размера и температуры нагрева с целью предотвращения образования термических трещин и, как следствие, повышения качества выпускаемой стали.

Введение

Одним из доминирующих направлений развития современной металлургической промышленности является расширение области применения непрерывной разливки стали. В связи с этим продолжают исследования по разработке новых и усовершенствованию внедренных технологий данного способа. К преимуществам непрерывной разливки относятся: однородность кристаллического строения и технологических свойств литой стали вдоль оси заготовки; повышение качества непрерывнолитой стали (по сравнению со сталью, полученной при литье в изложницы) за счет интенсивного охлаждения поверхности заготовки; возможность механизации и автоматизации процесса и существенное улучшение условий труда на разливочной площадке; возможность совмещения непрерывной разливки и прокатки в единой технологической линии [1]. Схема криволинейной машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с шестью зонами вторичного охлаждения (ЗВО) приведена на рис. 1.

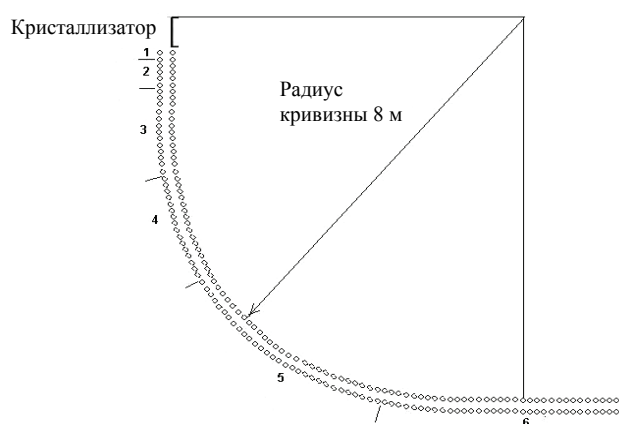


Рис. 1 Схема криволинейной МНЛЗ

Одним из способов повышения качества металла является разработка и применение оптимальных условий охлаждения заготовок, которые позволяют снизить образование поверхностных дефектов. К числу наиболее распространенных, опасных и трудноустраняемых видов брака металлопродукции относят поверхностные трещины, образование которых возможно на всех стадиях ТП.

Формирование трещин в стальных непрерывнолитых заготовках является нерешенной проблемой. Трещины в объеме возникают в районе углов, в осевой части и по диагонали между противоположными углами заготовки. На поверхности продольные и поперечные трещины располагаются на гранях и в углах заготовок. Как правило, металл, пораженный внутренними нарушениями сплошности, после нагрева подвергается обработке давлением. В таких случаях решающее значение имеет размер полости трещины и условия деформирования. При прокатке внутренние нарушения сплошности становятся причиной возникновения поперечных трещин – разрывов внутри деформированного металла, часто выходящих на его поверхность. Металл, пораженный таким дефектом, бракуется.

1 Постановка задачи

К образованию нарушений сплошности в заготовках приводят термические напряжения – напряжения, возникающие в твердой оболочке заготовки при неравномерном распределении температур, вызванном неравномерным охлаждением заготовки в машине непрерывного литья заготовок, т.е. величина, характеризующая интенсивность действия сил, имеющих термическую природу, внутри твердой оболочки затвердевающей заготовки [2].

Исследования управляемости процессом затвердевания непрерывнолитой заготовки в МНЛЗ показывают ограниченные возможности внешнего охладителя для массивных заготовок. При этом увеличение расхода охладителя (воды, водяного пара или газо-воздушной эмульсии) приводит к более интенсивному охлаждению поверхности, увеличению перепада температур в затвердевающей корке заготовки и, следовательно, термонапряжений и трещин на поверхности заготовки, в то же время скорость затвердевания изменяется незначительно. Это говорит об исчерпывающих возможностях внешних граничных управлений.

Одним из эффективных способов управления формированием заготовки в кристаллизаторе является ввод вовнутрь заготовки внутренних охладителей. В качестве таковых в разное время использовались металлические порошки и дробь, армирующие вставки (лента, стержень, каркас), инертные газы в газообразном и сжиженном состоянии, водоохлаждаемые охладители. Ввод экзогенных центров кристаллизации в жидкий металл снимает его перегрев, уменьшает время общего затвердевания и улучшает макроструктуру получаемых заготовок. Расплавляясь, охладитель поглощает тепло жидкого металла и становится новым центром кристаллизации [3].

Сложность конструирования машин непрерывной разливки с вводом внутренних охладителей в свое время не позволила внедрить их на металлургических и машиностроительных предприятиях, но в настоящее время в связи с повышением требований к качеству металла, необходимостью получения заготовок с заданной структурой и механическими свойствами среди исследователей вновь возникла идея возвращения к описанным выше технологиям и конструкциям.

Была поставлена задача провести пассивный эксперимент для оценки эффективности применения внутреннего охладителя с целью снижения перепада температуры по сечению заготовки и, следовательно, снижения ее термического напряжения.

2 Математическая модель

В качестве математической модели для расчетов температурного поля в прямоугольной заготовке используется известное нелинейное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \rho C_{\text{эф}} \left[v \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

где $C_{\text{эф}}$ – эффективная теплоемкость, Вт/кг·°C; ρ – плотность, кг/м³; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·с·°C; v – скорость вытягивания заготовки, м/с.

Начальные условия задачи управления затвердеванием заготовки задаются в виде

$$T(x, y, z)_{z=0} = T_0 = \text{const},$$

где T_0 – температура подаваемого в кристаллизатор металла, °C.

Для расчета температурного поля при использовании внутренних охладителей добавляются начальные условия:

$$T_{\text{охл}}(x, y, z)_{z=0} = T_{\text{охл}0} < T_{\text{solid}},$$

где $T_{\text{охл}0}$ – температура подаваемого в металл охладителя, °C; T_{solid} – температура затвердевания металла, °C.

Для определения теплообмена на внешней поверхности заготовки задаются граничные условия. В кристаллизаторе задаются граничные условия второго рода – плотность тепловых потоков (q), при этом по широкой и узкой граням она одинакова:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q.$$

Для зон вторичного охлаждения задается граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial l} = \alpha_{\Sigma} (T_{\text{пов}} + T_{\text{ср}}),$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности заготовки, Вт/°C·м²; $T_{\text{пов}}$ и $T_{\text{ср}}$ – температуры поверхности заготовки и среды, °C; l, x, y – координаты по длине и поперечному сечению заготовки, м.

Имеются ограничения на размер охладителя (исходя из физической сущности задачи):

$$h_{\text{охл}} < h, \quad l_{\text{охл}} < l,$$

где $h_{\text{охл}}$ – толщина охладителя, м; h – толщина заготовки, м; $l_{\text{охл}}$ – ширина охладителя, м; l – ширина заготовки, м.

В качестве управляющих воздействий в системе могут быть выбраны начальное распределение температуры в охладителе и его размеры.

3 Результаты моделирования

В результате математического моделирования процесса затвердевания непрерывнолитой заготовки в МНЛЗ, выполненного при следующих исходных данных: марка стали 08пс (ГОСТ 1050), сечение заготовки $1100 \times 250 \text{ мм}^2$, скорость вытягивания 0,7 м/с, температура металла в промежуточном ковше 1550°C , температура окружающей среды 20°C , МНЛЗ криволинейного типа с водовоздушным охлаждением, шесть зон вторичного охлаждения, длины по зонам составляют: 0,15; 0,72; 1,79; 2,9; 2,56; 3,12 м, расход воды по зонам составляет 1300, 5000, 6500, 12000, 9500, 10500 кг/ч, получено распределение температуры по сечению заготовки в различные моменты времени.

Рассчитано температурное поле заготовки с вводом в кристаллизатор охладителя из сплава того же химического состава различного прямоугольного сечения (150×400 , 100×100 и $50 \times 50 \text{ мм}^2$) и с начальной температурой нагрева $20 \dots 500^\circ\text{C}$. Схема расположения охладителя внутри заготовки приведена на рис. 2. В табл. 1 приведена разность температур между поверхностью заготовки и ее центральной частью по мере прохождения заготовки вдоль технологической линии МНЛЗ при вводе охладителя крупного сечения $150 \times 400 \text{ мм}^2$ при различной температуре охладителя.

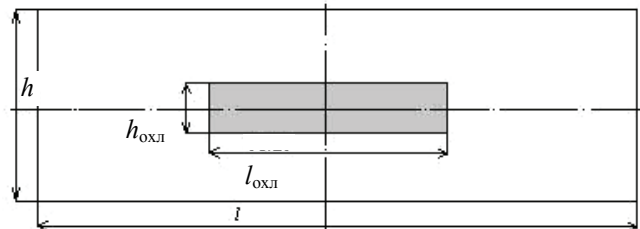


Рис. 2 Схема расположения охладителя внутри заготовки

Таблица 1

Разность температуры между поверхностью и центром заготовки
в зависимости от начальной температуры охладителя, $^\circ\text{C}$

Особенности охлаждения	Зоны вторичного охлаждения				МГР
	1	3	4	5	
Без охладителя	740	590	550	510	400
$150 \times 400 \text{ мм}^2$ 20°C	700	550	440	420	210
$150 \times 400 \text{ мм}^2$ 200°C	740	550	460	430	230
$150 \times 400 \text{ мм}^2$ 500°C	730	540	500	420	240

Анализ результатов расчетов показывает, что разница температур между охлажденной поверхностью и горячей сердцевиной без ввода охладителя достигает наибольшего значения в кристаллизаторе ($750 \dots 800^\circ\text{C}$) и снижается по мере охлаждения, составляя около 400°C на выходе из ЗВО. Использование внутреннего охладителя позволяет значительно снизить перепад температур по сечению заготовки на всем протяжении МНЛЗ (до 240°C на выходе из ЗВО), что приводит к уменьшению термических напряжений и, как следствие, снижению риска образования горячих трещин.

Изменение начальной температуры охладителя не оказывает значительного влияния на перепад температуры по сечению заготовки, следовательно, можно обойтись без затрат на его обогрев. Вне зависимости от начальной температуры поверхность охладителя нагревается до температуры ликвидуса, что обеспечивает его бесшовную свариваемость с заготовкой.

В табл. 2 приведена разность температур между поверхностью заготовки и ее центральной частью по мере прохождения заготовки вдоль технологической линии МНЛЗ при вводе охладителя с температурой 20 °С и различной шириной сечения до машины газовой резки (МГР).

Таблица 2

Разность температуры между поверхностью и центром заготовки
в зависимости от ширины сечения охладителя, °С

Размер сечения охладителя, мм ²	Зоны вторичного охлаждения				МГР
	1	3	4	5	
50×50	760	595	530	495	320
150×50	740	570	470	430	240
400×50	725	575	460	435	220

Увеличение ширины сечения охладителя приводит к снижению перепада температур по сечению и уменьшению времени, необходимого для полного затвердевания заготовки. Однако можно ожидать, что на практике оно будет определяться прежде всего техническими ограничениями, связанными со сложностью ввода охладителя в металл.

В табл. 3 приведена разность температур между поверхностью заготовки и ее центральной частью по мере прохождения заготовки вдоль технологической линии МНЛЗ при вводе охладителя с температурой 20 °С, шириной сечения 400 мм и различной толщиной сечения.

Таблица 3

Разность температуры между поверхностью и центром заготовки
в зависимости от толщины сечения охладителя, °С

Размер сечения охладителя, мм ²	Зоны вторичного охлаждения				МГР
	1	3	4	5	
400×50	725	575	460	435	220
400×100	715	560	450	425	215
400×150	700	550	440	420	210

Увеличение толщины сечения охладителя сказывается на перепаде температур незначительно, что позволяет без потери эффективности применять охладители малой толщины (≤50 мм). Это объясняется тем, что температура по высоте заготовки распределяется более равномерно, чем по ширине.

Заключение

Таким образом, по результатам моделирования можно сделать вывод о возможности и целесообразности применения внутренних охладителей прямоугольного сечения для управляемости процессом затвердевания непрерывнолитой заготовки в МНЛЗ и, как следствие, предотвращения образования термических трещин и повышения качества выпускаемой стали.

Список литературы

1. **Девятков, Д. Х.** Оптимальное управление тепловой обработкой в непрерывной разливке стали / Д. Х. Девятков. – Магнитогорск, 1998. – 130 с.
2. **Скворцов, А. А.** Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, В. А. Ульянов. – М. : Металлургия, 1991.
3. **Герман, Э.** Непрерывное литье / Э. Герман. – М. : Metallurgizdat, 1961.

РАЗРУШЕНИЕ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВСЛЕДСТВИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УСТАЛОСТИ

Изучено состояние материала лопатки турбины низкого давления газоперекачивающего агрегата, разрушенной в процессе эксплуатации. Установлено, что разрушение произошло в результате образования и развития трещины. Трещина возникла в процессе эксплуатации в результате охрупчивания границ зерен металла вследствие развития процессов высокотемпературной усталости.

Введение

Рабочие лопатки газовых турбин являются наиболее нагруженными деталями газотурбинных двигателей (ГТД) газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Ресурс работы лопаток определяется многими эксплуатационными факторами, такими как температура и рабочие напряжения, время наработки при различных режимах, скорость и амплитуда перепадов температур, количество пусков, уровень динамических нагрузок. Все эти факторы способствуют преждевременному разрушению лопаток в процессе эксплуатации, что может вызвать отказ ГТД.

Наиболее распространенной причиной разрушения рабочих лопаток турбин является высокотемпературная усталость.

Целью данной работы являлось изучение закономерностей протекания процессов высокотемпературной усталости в жаропрочных никелевых сплавах на основе анализа характера разрушения турбинной лопатки.

1 Материал и методика исследования

Объектами исследований являлись образцы, вырезанные из фрагмента разрушенной в процессе эксплуатации рабочей лопатки турбины низкого давления (ТНД) газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4. Фактическая наработка лопаток составляла 9913 ч. Поверхность разрушения располагалась в средней части пера лопатки на расстоянии ~95 мм от замковой части. Для проведения сравнительных исследований использовали образцы из неразрушенной лопатки того же комплекта.

Химический состав материала лопаток определяли атомно-эмиссионным методом по ГОСТ 22001–87. Анализ микро- и макроструктуры лопаток проводили с применением оптических микроскопов «Неофот-32» и МБС-9. Рентгеноструктурный анализ сплава выполнен на поперечном шлифе образца на дифрактометре «Дрон-3М» ($\text{Cu-K}\alpha$ -излучение) в симметричной съемке по Брэггу-Брентано. Параметры субструктуры материала (размер субзеренных блоков и величину микродеформаций в них) определяли методом аппроксимаций из физического уширения рентгеновских линий (111) и (222) γ -фазы.

Микротвердость измеряли на микротвердометре ПМТ-3 при нагрузке на индентор ~1 Н. Твердость по Виккерсу определяли на ультразвуковом твердометре МЕТ-У1 по ГОСТ 22761–77.

Физико-механические характеристики (предел прочности, относительные удлинения и сужения) материала лопаток определяли на разрывной машине У10Т по ГОСТ 1497–84.

2 Результаты исследований и их обсуждение

Методом атомной адсорбции установлено, что лопатки изготовлены из сложнолегированного жаропрочного никелевого сплава, химический состав которого приведен в табл. 1. По результатам анализа проб, взятых из разрушенной и целой лопаток, материал по химическому составу близок к сплавам ЭИ765Л и ЭИ893Л. Установлено пониженное содержание вольфрама и молибдена. Следует отметить, что данное отклонение фактического химического состава от регламентированного может оказать существенное влияние на служебные свойства сплава, особенно на жаростойкость, и, следовательно, на работоспособность материала лопатки. Особое внимание следует обратить на низкое содержание алюминия и титана, которые участвуют в образовании упрочняющих интерметаллидных фаз, обеспечивающих жаропрочность сплава.

Таблица 1
Химический состав материала лопаток турбины, % (по массе)

Материал	Ni	Cr	W	Mo	Ti	Al	Fe	V	Si	Nb	Co	Mn	B
Разрушенная лопатка	74,9	15,5	3,5	2,39	1,24	1,2	0,54	0,32	0,16	0,15	0,05	0,025	0,02
Целая лопатка	71,5	15,2	3,1	2,7	1,77	1,7	2,99	–	0,16	–	–	0,03	–
Сталь ЭИ 765Л	основа	14–16	4–6	3–5	1–1,4	1,7–2,2	<3	–	0,6	–	–	0,5	0,01
Сталь ЭИ 893Л	основа	15–17	9–10	3,5–4,5	1,2–1,6	1,2–1,6	<3,0	–	<0,5	–	–	<0,5	–

По результатам рентгеноструктурного анализа фазовый состав материала разрушенной лопатки представляет собой γ -твердый раствор легирующих элементов и карбидных фаз (типа Me_{23}C_6 , Me_7C_7 , MeC) в никелевой матрице. γ -фаза имеет крупноблочную субструктуру (~ 500 нм) со средним уровнем микродеформаций в них $\epsilon = 0,00032$. Плотность дислокаций на границах и внутри субзерен никеля одного порядка, составляет $\sim 10^9$ и $5,1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Металлографические исследования показали, что металл имеет крупнозернистую, равноосную структуру и состоит из γ -твердого раствора легирующих элементов в никеле, незначительного количества упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы ($\text{Ni}_3(\text{TiAl})$) и карбидов типа Me_{23}C_6 , Me_7C_7 , MeC . В неразрушенной лопатке карбиды имеют округлую форму ($d \approx 1\text{--}4$ мкм) и равномерно расположены как по границам, так и по телу зерна, не образуя сетки (рис. 1,а). Карбидная и интерметаллидная фазы равномерно распределены в матрице. Такая картина наблюдается по всему телу целой лопатки.

В разрушенной лопатке карбиды имеют вытянутую форму и располагаются преимущественно по границам зерна в виде сетки (рис. 1,б), что способствует охрупчиванию материала и образованию микротрещин. Интерметаллидная фаза сосредоточена ближе к границам зерен. Количественное соотношение фаз в сплаве, их форма, размер и равномерность распределения зависят от характера кристаллизации, а значит, и от условий охлаждения, которые могут существенно отличаться для толстого (замковая часть и входная кромка пера) и тонкого сечения (выходная кромка пера) сечений лопатки.

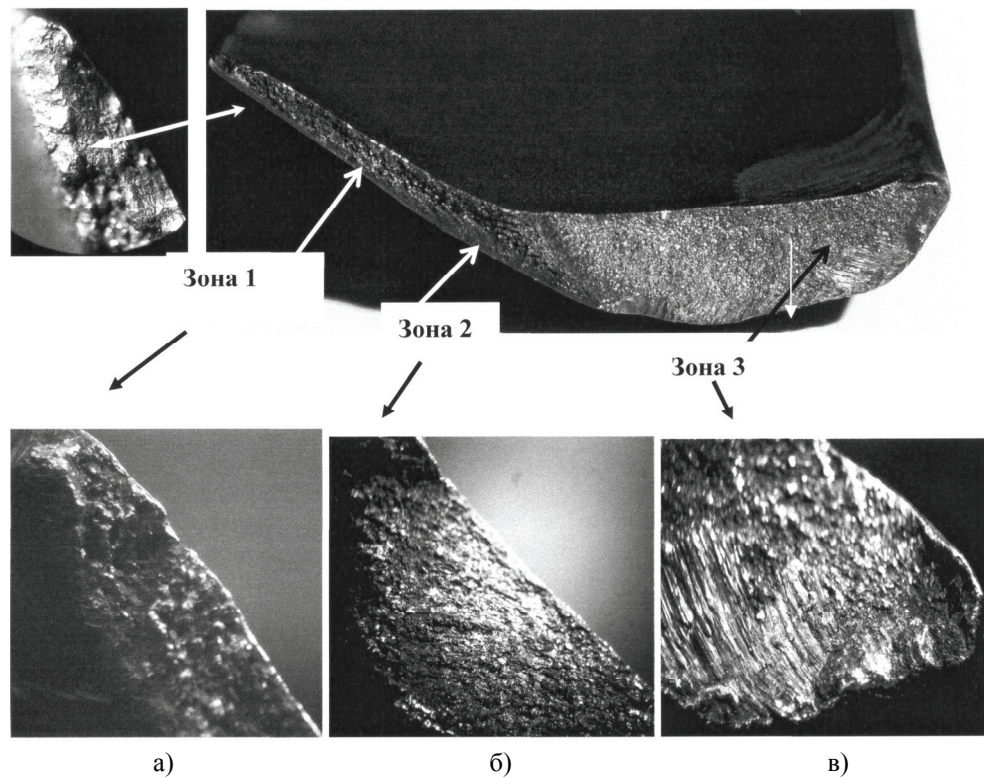


Рис. 1 Макроструктура излома лопатки турбины и его характерные зоны, $\times 25$

Несомненным является и то, что при эксплуатации структурные и фазовые превращения в результате температурно-силового воздействия наиболее интенсивно протекают в тонком сечении – в выходной кромке лопатки. К основным структурным превращениям, происходящим в этой зоне, относятся коагуляция карбидной фазы, диссоциация упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы, формирование карбидной сетки по границам зерен γ -фазы. Химическая и фазовая неоднородность, в свою очередь, способствуют ухудшению тепловой структурной стабильности сплава и, в конечном счете, разрушению выходной кромки пера лопатки.

Фрактографический анализ поверхности излома позволил выделить три характерные зоны: зону стабильного развития трещины 1, зону ускоренного развития трещины 2 и зону долома 3 (рис. 2).

В зоне стабильного развития усталостной трещины (рис. 2,а) наблюдаются ступеньки, утоняющиеся к зоне ускоренного развития. Изгибы линий излома обусловлены неоднородностью микромеханических свойств элементов структуры в направлении максимальной интенсивности напряжений. Кроме этого, наблюдается выкрашивание материала, сильная пористость. На отдельных фрагментах обнаружены трещины, уходящие вглубь металла. Материал в этой зоне имеет окисленный и рыхлый вид. Для рельефа характерна небольшая складчатость. Вид этой зоны указывает на термоусталостный характер разрушения. В зоне ускоренного развития трещины (рис. 2,б) наблюдаются цвета побежалости от синего (более толстая окисная пленка), что соответствует более высокой температуре и большему времени воздействия окислительной среды, до соломенного (более тонкая пленка), что говорит о

более быстрое распространение трещины в данном месте. Поверхность зоны долома (рис. 2,в) чистая, неоxygenная и состоит из крупных (диаметром в несколько зерен) хрупко-вязких ямок. Конец пера разрушенной лопатки загнулся. Это свидетельствует о том, что металл в этой части лопатки находится в пластичном состоянии.

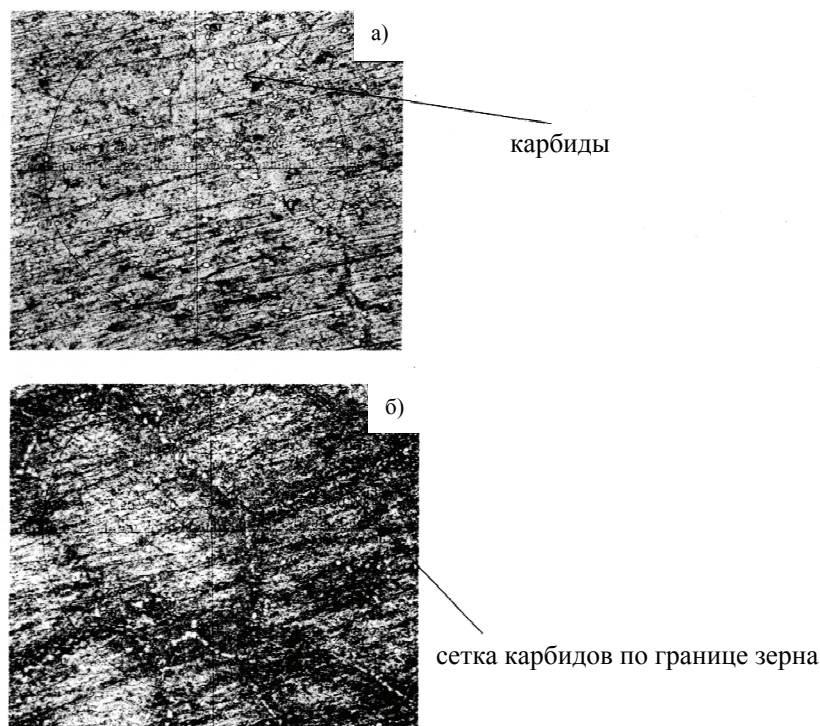


Рис. 2 Микроструктура целой (а) и разрушенной (б) лопаток турбины, $\times 500$

Преждевременное разрушение произошло в результате комбинированного воздействия окружающей среды и циклических напряжений. Образование трещины могло быть ускорено действием напряжений в области локальных коррозионных повреждений. Для газообразных сред перенос вещества за счет адсорбции атомов газообразной среды доминирует при высоких напряжениях. Основное же влияние на распространение трещины окружающая среда оказывает на ранних стадиях ее роста, когда существуют короткие трещины, из-за того, что обеспечивается непосредственный доступ газов к вершине трещины, а скорость роста настолько низкая, что успевает произойти взаимодействие материала и среды. Адсорбция газов трещиной может вызвать уменьшение поверхностной энергии металла и, как следствие, увеличение скорости роста трещин. Образующиеся при высоких температурах оксидные пленки, с одной стороны, взаимодействуя с металлом, препятствуют захлопыванию трещины во время сжимающей нагрузки, а с другой, могут приводить к притуплению кончика трещины и к коррозии под напряжением [1].

В условиях высоких температур возможны сложные взаимодействия между процессами усталости и окисления. Влияние оксидов на процесс усталости основывается на модели повторяющегося разрушения оксидной пленки, что соответствует случаю непрерывного разрушения хрупкой поверхно-

сти пленки при деформировании. Дальнейшее окисление незащищенного металла может быть ускорено в результате окисления карбидов.

Вблизи контура излома и полости трещины обнаружен светлый нетравящийся слой, свидетельствующий об изменении в нем содержания легирующих элементов (рис. 3). Это свидетельствует о протекании диффузионных процессов. При этом трещины возникали в местах слияния пор в белых нетравящихся областях по границам зерен, ориентированных перпендикулярно действующей нагрузке и тепловому потоку.

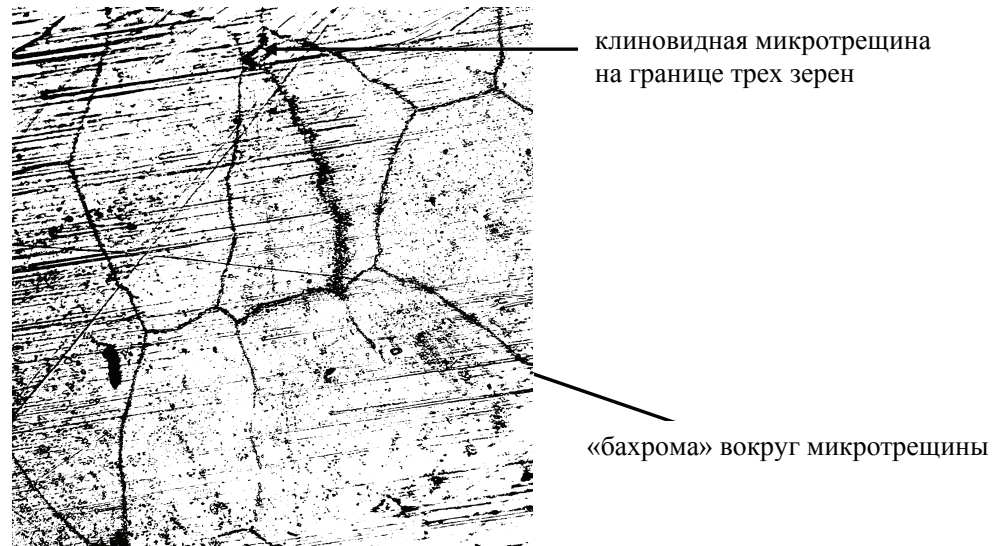


Рис. 3 Микроструктура излома разрушенной лопатки турбины, $\times 500$

В рассматриваемом случае усталостное разрушение сопровождалось длительным развитием магистральной трещины по субмикротрещинам. Имеются участки как внутризеренного разрушения, так и межзеренного.

Трещины, располагающиеся по телу зерна, имеют широкую полость раскрытия, заполненную продуктами окисления. Наблюдается выделение темной фазы в виде дисперсных игл, направленных перпендикулярно или под небольшим углом к направлению развития трещины, и окружающих ее полость в виде «бахромы» (рис. 3).

Известно, что при температуре выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ усталостная долговечность исследуемого сплава контролируется переходом от транскристаллитного разрушения к интеркристаллитному.

Влияние границ зерен на процесс усталостного разрушения имеет сложный характер и заключается в задержке развития процессов пластической деформации и распространении микротрещин. Развитие межзеренного разрушения при воздействии высоких циклических нагрузок в условиях нормальных температур свидетельствует о более низкой сопротивляемости усталости границ по сравнению с телом зерна [1].

Согласно современным теоретическим представлениям интеркристаллитное разрушение осуществляется с помощью двух основных механизмов: путем образования округлых пор (r -тип) или путем образования клиновидных трещин на стыке трех зерен (W -тип) (рис. 4) [2]. Непременным условием

обоих типов разрушения является предварительное зарождение небольших пор на границах зерен [2, 3]. Порообразование связано с зернограницными выделениями. Расположенные на границе зерна частицы, являясь эффективными концентраторами напряжений, способствуют зарождению пор за счет торможения зернограницного скольжения. Зарождение пор происходит преимущественно около частиц на границах зерен, т.к. в этих местах гетерогенного зарождения не только меньше критический объем зародышей, но и выше коэффициент зернограницной диффузии, что и предопределяет меньшее время инкубационного периода для скопления вакансий критического размера.

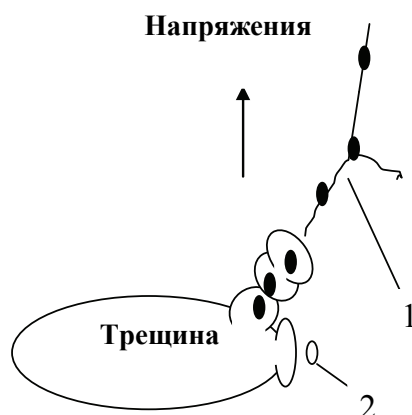


Рис. 4 Накопление повреждений перед трещиной: 1 – межзеренные повреждения при высокой температуре; 2 – образование пустот

Для выявления зон деформационного упрочнения и разупрочнения в работе использован метод измерения микротвердости, являющийся структурно-чувствительным. Результаты измерения микротвердости материала разрушенной лопатки показали неоднородное ее распределение по рабочей поверхности вблизи зоны разрушения. Имеется зона деформационного упрочнения с микротвердостью 5,5–6,3 ГПа и разупрочненная зона, в которой микротвердость существенно меньше (~2,3 ГПа) и не соответствует нормативным требованиям (2,95–3,70 ГПа), предъявляемым к жаропрочным никелевым сплавам. Измерения твердости по Виккерсу ультразвуковым методом подтвердили наличие в материале разрушенной лопатки разупрочненной зоны. Снижение прочностных свойств обусловлено разрыхлением материала в результате протекания процессов высокотемпературной усталости.

Измерения, проведенные в осевом сечении целой лопатки, показали однородное распределение микротвердости по рабочей поверхности и поперечному шлифу в пределах 3,7–4,2 ГПа. Время работы при повышенных температурах ~500 °С оказалось достаточным для прогрева лопаток и их разупрочнения в связи с растворением интерметаллидной фазы, о чем свидетельствуют результаты исследований микроструктуры и резкое снижение твердости в сечении лопатки от основания пера до места разрушения.

Результаты механических испытаний материала разрушенной лопатки показали пониженные значения относительного удлинения в 1,12 раза (с 29,8 до 26,43 %) и предела прочности в 1,45 раза (с 1,24 до 0,89 ГПа) по сравнению с целой лопаткой.

Выводы

На основании результатов проведенных исследований разрушенной и целой рабочих лопаток турбины низкого давления газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4 установлено:

1. Разрушение лопатки произошло в ее средней части пера со стороны корыта ближе к выходной кромке в результате образования и дальнейшего развития трещины. Трещина возникла в процессе эксплуатации из-за охрупчивания границ зерен металла в этой зоне вследствие развития процессов высокотемпературной усталости.

2. Несоответствие химического состава материала лопатки условиям ее эксплуатации привело к снижению жаропрочности и работоспособности при повышенной температуре.

Список литературы

1. **Матвиенко, А. Ф.** Исследование изломов лопаток осевого компрессора из стали 20Х13 / А. Ф. Матвиенко, А. В. Балдин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1981. – № 6. – С. 39–41.
2. Усталость материалов при высокой температуре : пер. с англ. / под ред. Р. П. Скелтона. – М. : Металлургия, 1988. – 343 с.
3. **Самсонович, Е. Н.** Фрактографические особенности и механизм усталостного разрушения сталей 20ГЛ и 20ГФЛ / Е. Н. Самсонович, А. Н. Харитонов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1981. – № 6. – С. 41–44.

УДК 669:620.193/197

С. Н. Виноградов, В. И. Волчихин, Е. В. Ширина, А. С. Мещеряков

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ПЛАСТОВОЙ ВОДЕ

Статья содержит описание коррозионных испытаний низкоуглеродистой, хромистой и нержавеющей сталей в пластовой воде. Приведены исследования скорости коррозии низкоуглеродистой и хромистой сталей в зависимости от катодного потенциала защиты. На основании полученных результатов установлено, что катодная электрохимическая защита данных сталей в пластовой воде является эффективной.

Введение

Очистка пластовой воды от нефти и твердых взвешенных частиц производится в отстойниках, которые изготавливаются из различных конструкционных сталей. Обычно в пластовой воде содержатся хлориды, сульфаты, сульфиды при разнообразном катионном составе, растворенные кислород, диоксид углерода, сероводород, нефтепродукты и механические примеси. Хлориды и сульфаты повышают коррозионную агрессивность пластовой воды. Адсорбируясь на поверхности металла, они образуют соединения, обладающие хорошей растворимостью, что приводит к увеличению скорости коррозии сталей. Пластовая вода способна вызывать общую или локальную коррозию различного вида конструкционных сталей. Достижение пассивного состояния низколегированных и среднелегированных сталей в таких электролитах затруднено, а в некоторых случаях вообще невозможно. Даже для высоколегированных хромом сталей пассивное состояние в данном электролите является не вполне устойчивым, из-за чего возможно появление питтинговой коррозии. Механические примеси, имеющиеся в пластовой воде приводят к усиленной коррозии конструкционных сталей, т.к. они способны разрушать поверхностную пленку, либо усиливают локальные коррозионные процессы вследствие возникновения пар дифференциальной аэрации [1].

Целью исследования является выявление особенностей электрохимического поведения низкоуглеродистых, хромистых и хромоникелевых сталей оборудования отрасли в пластовой воде и создание комплексного метода защиты от коррозии.

1 Методика эксперимента

Исследование проводилось в электролите следующего состава, близком по составу пластовой воде (г/л): NaCl – 48; Ca – 7,4; Na₂CO₃ – 2,65; Na₂SO₄ – 0,5; Na₂S – 0,08; механические примеси – 30; pH 6,54.

Коррозионные испытания конструкционных сталей проводились в стеклянной ячейке емкостью 0,2 л, которая термостатировалась. Исследованиям подвергались низкоуглеродистая сталь (Ст.3), хромистая сталь (08X18T) и нержавеющая сталь (08X18H10T) по отдельности и образующие замкнутые системы.

Образцы зачищали наждачной шкуркой и затем травили в разбавленной соляной кислоте.

Исследования проводили без перемешивания электролита, с перемешиванием электролита, а также с перемешиванием электролита, содержащего

песок, в открытой и замкнутой емкостях при температуре 50 °С в течение 24 ч. Для перемешивания электролита применялось роторное перемешивающее устройство. Убыль массы (износ) образца определяли взвешиванием на аналитических весах с погрешностью измерения $\pm 0,0001$ г.

2 Результаты исследования

На рис. 1 представлены результаты испытаний низкоуглеродистой стали (Ст.3).

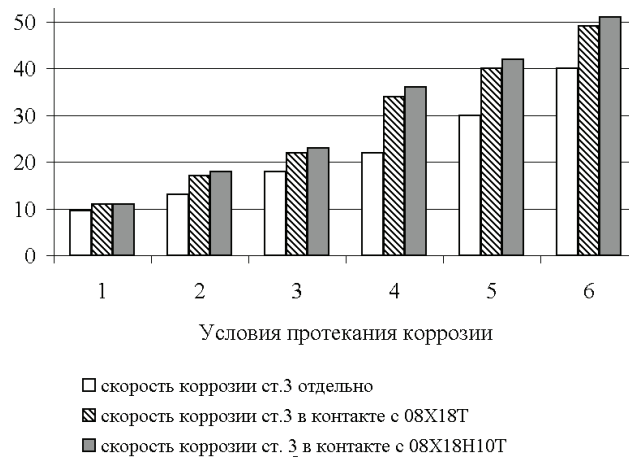


Рис. 1 Скорость коррозии Ст.3 в пластовой воде отдельно и в контакте со сталями 08X18T и 08X18H10T: 1 – в закрытой емкости без перемешивания; 2 – в закрытой емкости с перемешиванием; 3 – в закрытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок; 4 – в открытой емкости без перемешивания; 5 – в открытой емкости с перемешиванием; 6 – в открытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок

Как видно из диаграммы (рис. 1), низкоуглеродистая сталь (Ст.3) в значительной степени подвержена коррозии. В закрытой емкости без перемешивания электролита скорость коррозии составляет 9,6 г/(м²·сут). При перемешивании электролита скорость коррозии увеличивается до 13 г/(м²·сут). Это связано с тем, что процесс коррозии Ст.3 в пластовой воде протекает с кислородной деполяризацией, и, следовательно, при увеличении скорости подвода кислорода к поверхности образца увеличивается скорость коррозии данной стали [2]. При перемешивании электролита, содержащего песок, скорость коррозии Ст.3 в замкнутой емкости составляет 18 г/(м²·сут). Увеличение скорости коррозии Ст.3 связано с дополнительным механическим изнашиванием поверхности образца.

В открытой емкости при всех вариантах испытаний скорость коррозии низкоуглеродистой стали выше, чем в замкнутой емкости. Так, скорость коррозии Ст.3 без перемешивания электролита в замкнутой емкости составляет 9,6 г/(м²·сут), а в открытой емкости – 22 г/(м²·сутки). Это связано с тем, что процесс коррозии Ст.3 в пластовой воде протекает с кислородной деполяризацией, и поэтому при увеличении диффузии кислорода к поверхности образца скорость коррозии данной стали увеличивается.

При контакте с хромистой и нержавеющей сталями Ст.3 в большей степени подвержена коррозии, по сравнению со скоростью коррозии Ст.3 от-

дельно. В контакте с хромистой сталью скорость коррозии Ст.3 увеличилась в среднем в 1,3 раза, а при контакте с нержавеющей сталью – в 1,5 раза. Повышение скорости коррозии Ст.3 при контакте с хромистой и нержавеющей сталями связано с образованием короткозамкнутого коррозионного элемента, в котором низкоуглеродистая сталь Ст.3 имеет более электроотрицательный потенциал и, следовательно, является анодом в данной системе, поэтому скорость коррозии Ст.3 увеличивается [4]. В открытой емкости скорость коррозии Ст.3 увеличилась в большей степени по сравнению со скоростью коррозии Ст.3 в закрытой емкости. Это связано с тем, что при достаточной аэрации хромистая и нержавеющая стали пассивируются и являются более эффективными катодными электродами, чем в замкнутой емкости, т.к. при недостатке кислорода пассивное состояние хромистой стали неустойчивое [5].

Различное ускорение коррозии в открытой и закрытой емкостях связано с различной диффузией кислорода к поверхности электрода. В открытой емкости аэрация больше, а это способствует увеличению скорости коррозии низкоуглеродистой стали.

Различное увеличение скорости коррозии Ст.3 при контакте с хромистой сталью, по сравнению со скоростью коррозии в контакте с нержавеющей сталью, связано с меньшей ЭДС коррозионного элемента Ст.3 – 08X18Т (204 мВ), по сравнению с ЭДС коррозионного элемента Ст.3 – 08X18Н10Т (324 мВ).

На рис. 2 приведены результаты коррозионных испытаний хромистой стали. Как видно из диаграммы, скорость коррозии хромистой стали (08X18Т) меньше, чем низкоуглеродистой стали (Ст.3), однако данная сталь в пластовой воде подвержена питтинговой коррозии. В замкнутом объеме, т.е. при ограниченном доступе кислорода, скорость коррозии стали 08X18Т несколько выше, чем скорость коррозии данной стали в открытой емкости. Так, скорость коррозии хромистой стали без перемешивания электролита в замкнутой емкости составляет 7,8 г/(м²·сут), а в открытой емкости – 6 г/(м²·сут). Это связано с тем, что для возникновения устойчивого пассивного состояния хромистой стали необходимо достаточное количество растворенного кислорода в системе [6]. При коррозии в замкнутой емкости аэрация недостаточна для образования прочной пассивной пленки на поверхности образца, поэтому в открытой емкости, при достаточной диффузии кислорода к поверхности, скорость коррозии стали 08X18Т снижается. Наличие механических примесей в электролите увеличивает скорость коррозии стали в связи с дополнительным механическим изнашиванием и разрушением пассивной пленки.

При контакте с нержавеющей сталью скорость коррозии хромистой стали увеличилась незначительно по сравнению со скоростью коррозии хромистой стали отдельно. Это связано с небольшим значением ЭДС коррозионного элемента «хромистая сталь – нержавеющая сталь», которое составляет 120 мВ.

В контакте с низкоуглеродистой сталью скорость коррозии хромистой стали несколько ниже, чем скорость коррозии хромистой стали в отдельности. Это вызвано образованием короткозамкнутого коррозионного элемента, в котором Ст.3 играет роль анода. Следовательно, при таком контакте хромистая сталь находится в условиях электрохимической защиты.

Результаты коррозионных испытаний стали 08X18Н10Т представлены на рис. 3.



Рис. 2 Скорость коррозии стали 08X18Т в пластовой воде отдельно и в контакте со сталями 08X18N10Т и Ст.3: 1 – в закрытой емкости без перемешивания; 2 – в закрытой емкости с перемешиванием; 3 – в закрытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок; 4 – в открытой емкости без перемешивания; 5 – в открытой емкости с перемешиванием; 6 – в открытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок



Рис. 3 Скорость коррозии стали 08X18N10Т в пластовой воде отдельно и в контакте со сталями 08X18Т и Ст.3: 1 – в закрытой емкости без перемешивания; 2 – в закрытой емкости с перемешиванием; 3 – в закрытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок; 4 – в открытой емкости без перемешивания; 5 – в открытой емкости с перемешиванием; 6 – в открытой емкости с перемешиванием электролита, содержащего песок

Как видно из диаграммы (рис. 3) нержавеющая сталь (08X18N10Т) при коррозии отдельно и в контакте с хромистой сталью во всех вариантах коррозионных испытаний мало подвержена коррозии, скорость изнашивания составляет в среднем $3,8 \text{ г/(м}^2\cdot\text{сут)}$. При контакте с низкоуглеродистой сталью скорость коррозии нержавеющей стали снижается. Это связано с образованием коррозионного элемента, в котором нержавеющая сталь является катодом.

Основываясь на полученных результатах коррозионных испытаний, можно предположить, что устойчивого пассивного состояния хромистой стали в данных условиях не наступает, поэтому возможно применение для ее защиты электрохимической катодной защиты.

Для подтверждения возможности применения катодной электрохимической защиты были проведены исследования скорости коррозии низкоуглеродистой (Ст.3) и хромистой (08X18Т) сталей в зависимости от катодного потенциала защиты. Для этого образцы подключали к отрицательному полю-

су источника постоянного тока. В качестве вспомогательного электрода использовали нерастворимый графитовый анод. По результатам данного исследования построена зависимость скорости коррозии Ст.3 и стали 08Х18Т от катодного потенциала защиты (рис. 4).

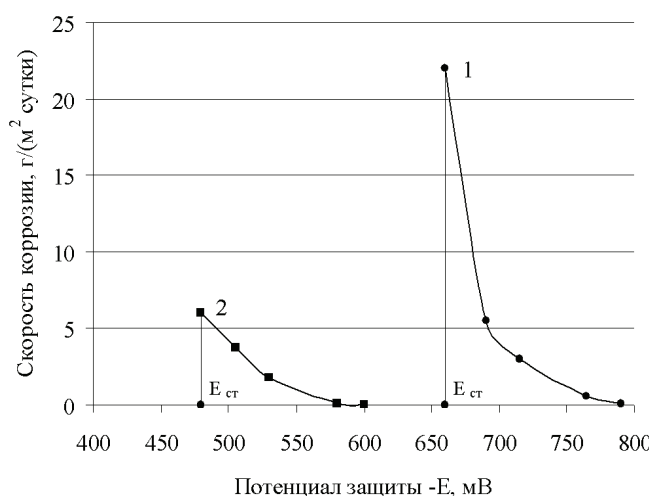


Рис. 4 Зависимость скорости коррозии низкоуглеродистой (1) и хромистой (2) сталей от катодного потенциала защиты

Как видно из графика (рис. 4), при смещении потенциала в отрицательную сторону скорость коррозии уменьшается и при определенном потенциале становится практически равной нулю. Для Ст.3 значение такого потенциала равно (–790) мВ, для стали 08Х18Т – (–600) мВ.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что катодная электрохимическая защита конструкционных сталей в пластовой воде нефтегазовой промышленности является эффективной.

Заключение

Установлено, что в пластовой воде Ст.3 подвержена сильной коррозии как в закрытой, так и в открытой емкости. При механическом контакте с нержавеющей и хромистой сталью скорость коррозии Ст.3 увеличивается за счет работы коррозионного гальванического элемента, в котором Ст.3 является анодом. Хромистая сталь в меньшей степени подвергается коррозии, при контакте с нержавеющей сталью скорость коррозии несколько увеличивается за счет работы коррозионного элемента. Нержавеющая сталь является коррозионно-устойчивой в пластовой воде отдельно и в контакте с Ст.3 и хромистой сталью.

Катодная электрохимическая защита значительно повышает коррозионную стойкость Ст.3 и хромистой стали. Поэтому для изготовления отстойников необходимо применять нержавеющую сталь либо Ст.3 или хромистую сталь с дополнительной катодной электрохимической защитой.

Список литературы

1. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность / под ред. А. М. Сухотина. – Л. : Химия, 1990. – 400 с.

2. **Томашов, Н. Д.** Теория коррозии и защиты металлов / Н. Д. Томашов. – М. : Изд-во Академии наук, 1960. – 590 с.
3. **Томашов, Н. Д.** Теория коррозии коррозионно-стойкие конструкционные сплавы / Н. Д. Томашов, Г. П. Чернова. – М. : Металлургия, 1986. – 360 с.
4. **Жук, Н. П.** Курс теории коррозии и защиты металлов / Н. П. Жук. – М. : Металлургия, 1976. – 472 с.
5. **Семенова, И. В.** Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов ; под ред. И. В. Семеновой. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
6. **Виноградов, С. Н.** Электрохимическое поведение конструкционных сталей в пластовой воде нефтегазовой промышленности / С. Н. Виноградов, Е. В. Ширина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2007. – № 6 (33). – С. 135–140. – (Естественные науки).

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ¹

Представлены результаты численных исследований деформирования гибкой струны под действием поперечной статически приложенной нагрузки. Задача решается методом конечных элементов. В рамках плоской задачи получены расчетные соотношения для вычисления матриц жесткости и геометрической жесткости конструкции. Построен итерационный алгоритм расчета, учитывающий нелинейную зависимость между прикладываемой нагрузкой и перемещением точек конструкции.

Введение

Существуют две причины нелинейного поведения конструкций. Первая обусловлена нелинейностью диаграммы прочности конструкционного материала даже в пределах малых перемещений – физическая нелинейность [1]. Вторая связана с изменением геометрии конструкции, которое вызывается значительным искажением ее формы в процессе деформирования – геометрическая нелинейность. Таким образом, некоторые элементы конструкций могут оказываться нелинейными, даже если они изготовлены из линейно упругого материала. Расчету таких конструктивных элементов посвящается данная работа.

В настоящее время для практических расчетов в самых различных областях науки используется метод конечных элементов (МКЭ). Известен ряд широко известных и хорошо зарекомендовавших себя конечно-элементных программных комплексов для проведения численных расчетов: ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и т.п. Некоторые из используемых в этих комплексах конечных элементов (КЭ) предназначены для дискретизации геометрически нелинейных конструкций: нить, трос, струна, упругая опора. Однако при этом существуют ограничения при формировании вектора нагрузок. Так, например, в программном комплексе ANSYS 10.0 дискретизация геометрически нелинейных конструкций возможна с помощью КЭ LINK 10, а расчетные соотношения для этого КЭ предполагают задание только простейших видов силовых воздействий – растяжение-сжатие. В действительности спектр нагрузок, действующих на подобные механические системы, значительно шире. Достаточно проанализировать работу таких конструкций: линии электропередач, растяжки для крепления рекламных плакатов, канатные дороги для транспортировки людей и грузов и т.п. В этих случаях силовое воздействие имеет не только существенную продольную, но и значительную поперечную составляющую, ответственную за нелинейное поведение. Следовательно, актуальна разработка КЭ, способного адекватно моделировать статическое и динамическое поведение геометрически нелинейных конструкций под действием поперечных нагрузок. Настоящая работа ставит своей целью разработку КЭ гибких элементов конструкции с учетом начальных деформаций.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (проект № 07-01-96605-р_поволжье_a; № 07-08-96620-р_поволжье_a; 09-08-00928_a).

Расчетные соотношения

Рассмотрим предварительно натянутую струну, закрепленную по концам и нагруженную сосредоточенной силой P (рис. 1). Для определения v – перемещения точки приложения силы, используем МКЭ.

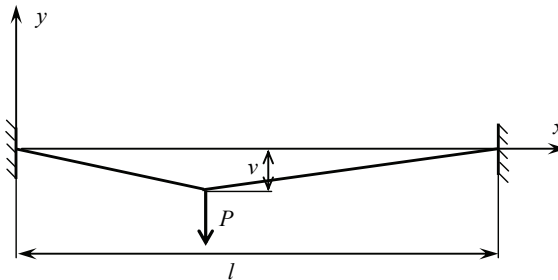


Рис. 1 Объект исследования

Задача статики описывается системой обыкновенных линейных алгебраических уравнений

$$[K]\{q\} = \{F\}. \quad (1)$$

Порядок уравнений равен числу степеней свободы, которое определяется степенью дискретизации конструкции. Здесь $[K]$ – матрица жесткости конструкции; $\{q\}$ – вектор узловых перемещений; $\{F\}$ – вектор узловых нагрузок,

$$[K] = [\bar{K}] + [G], \quad (2)$$

$[\bar{K}]$ – упругая составляющая матрицы жесткости; $[G]$ – матрица геометрической жесткости, учитывающая силу натяжения струны. Коэффициенты этой матрицы находятся в зависимости от узловых перемещений КЭ струны. Следовательно, для построения $[G]$ необходимо решить систему уравнений (1), что может быть достигнуто посредством последовательных итераций.

Представим КЭ в виде прямолинейного плоского стержня, направив ось x вдоль линий центров тяжести сечений (рис. 2). Вкладом в энергию деформирования от кручения и изгиба будем пренебрегать. В качестве обобщенных перемещений примем $\{u\} = \begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix}$. Здесь U – перемещение вдоль оси x , V – перемещение вдоль оси y . Положительные направления перемещений показаны стрелками на рис. 2. Функция перемещений задается в виде полинома первой степени

$$U(x) = a_1 + a_2x, \quad V(x) = a_3 + a_4x. \quad (3)$$

Для нахождения четырех постоянных ($a_i, i = 1 \dots 4$) используем граничные условия:

- 1) $U(x=0) = U_i$;
- 2) $V(x=0) = V_i$;
- 3) $U(x=L) = U_j$;
- 4) $V(x=L) = V_j$.

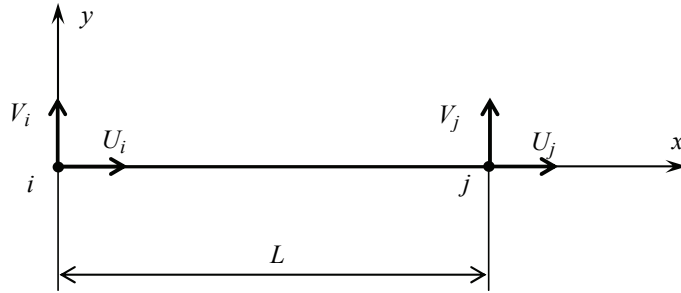


Рис. 2 Плоский конечный элемент струны

В результате уравнения (3) переписываются следующим образом:

$$U(\xi) = U_i(1 - \xi) + U_j\xi, \quad V(\xi) = V_i(1 - \xi) + V_j\xi. \quad (4)$$

Здесь $\xi = \frac{x}{L}$ – безразмерная координата. В матричной форме соотношения (4) можно записать в следующем виде:

$$\begin{Bmatrix} U \\ V \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\xi & 0 & \xi & 0 \\ 0 & 1-\xi & 0 & \xi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

или в сокращенной матричной форме:

$$\{u\} = [\Phi]\{q\}, \quad (6)$$

где $[\Phi]$ – матрица аппроксимирующих функций (функций формы).

Связь между деформациями и перемещениями принимается согласно [2]:

$$\varepsilon = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2. \quad (7)$$

В случае аппроксимирующих функций типа (3) деформация в пределах КЭ является постоянной (не зависит от координаты) и вычисляется по формуле

$$\varepsilon = a_2 + \frac{1}{2} a_4^2. \quad (8)$$

Для нахождения матрицы жесткости используется известная формула [3]

$$[\bar{K}] = \int_{Vol} [B]^T E [B] d(Vol), \quad (9)$$

где E – модуль Юнга; $[B]$ – матрица, полученная дифференцированием аппроксимирующих функций согласно формуле (7):

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2L^2} & 0 & \frac{1}{2L^2} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

В случае однородной струны с постоянной (в пределах КЭ) площадью поперечного сечения (A) формула (9) запишется в виде

$$[\bar{K}] = \int_L [B]^T EA[B] dL. \quad (11)$$

Тогда симметричная матрица $[\bar{K}]$ для КЭ длиной L имеет следующую структуру:

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\ & \frac{EA}{4L^3} & 0 & -\frac{EA}{4L^3} \\ & & \frac{EA}{L} & 0 \\ & & & \frac{EA}{4L^3} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Для нахождения матрицы геометрической жесткости используется формула [4], адаптированная для данного КЭ:

$$[G] = \int_L [S]^T N[S] dL. \quad (13)$$

Здесь N – сила натяжения струны; $[S]$ – матрица, полученная дифференцированием аппроксимирующих функций (4), определяется выражением

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Соответственно матрица геометрической жесткости для КЭ длиной L имеет следующую структуру:

$$[G] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{N}{L} & 0 & -\frac{N}{L} \\ & & 0 & 0 \\ & & & \frac{N}{L} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

В процессе деформирования струны будет происходить изменение силы натяжения N . Соответственно значения матрицы геометрической жесткости $[G]$ будут меняться. Именно поэтому решение системы уравнений (1) может быть получено только с помощью итерационных алгоритмов. Используется шаговый метод нагружения вкупе с методом последовательных приближений.

С этой целью в уравнение (1) вводится параметр нагрузки λ , изменяющийся в пределах от 0 до 1. В нашем случае разбиваем интервал изменения λ

на 10 отдельных участков: 0; 0,1; 0,2...1. При отсутствии сходимости решения количество интервалов необходимо увеличить. Тогда уравнение (1), записанное в виде

$$[K^*]\{q\} = \lambda\{F\}, \quad (16)$$

необходимо будет решать 10 раз. При этом на каждом шаге будет накапливаться величина вектора перемещения. Рассмотрим первый шаг этой процедуры.

Общая матрица $[K]$ на каждом этапе ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) решения системы (16) определяется через узловые перемещения, полученные на предыдущем этапе:

$$[K(q_{i-1})]\{q_i\} = \lambda\{F_i\}. \quad (17)$$

На первом этапе значения узловых перемещений для каждого КЭ определяются без учета изменения силы натяжения струны, т.е. задача решается в линейной постановке. Полученное приближенное решение соответствует точке A_1 на рис. 3. Для данных значений узловых перемещений определяются деформации (8), в соответствии с которыми уточняется значение сил натяжения $\{N\} = EA\{\epsilon\}$. Уточненное значение N подставляется в формулу (13). Затем по формуле (2) определяется матрица жесткости и согласно (1) рассчитывается вектор узловых нагрузок (F_1 на рис. 3), соответствующий нелинейному решению. Таким образом, получается точка B_1 на рис. 3.

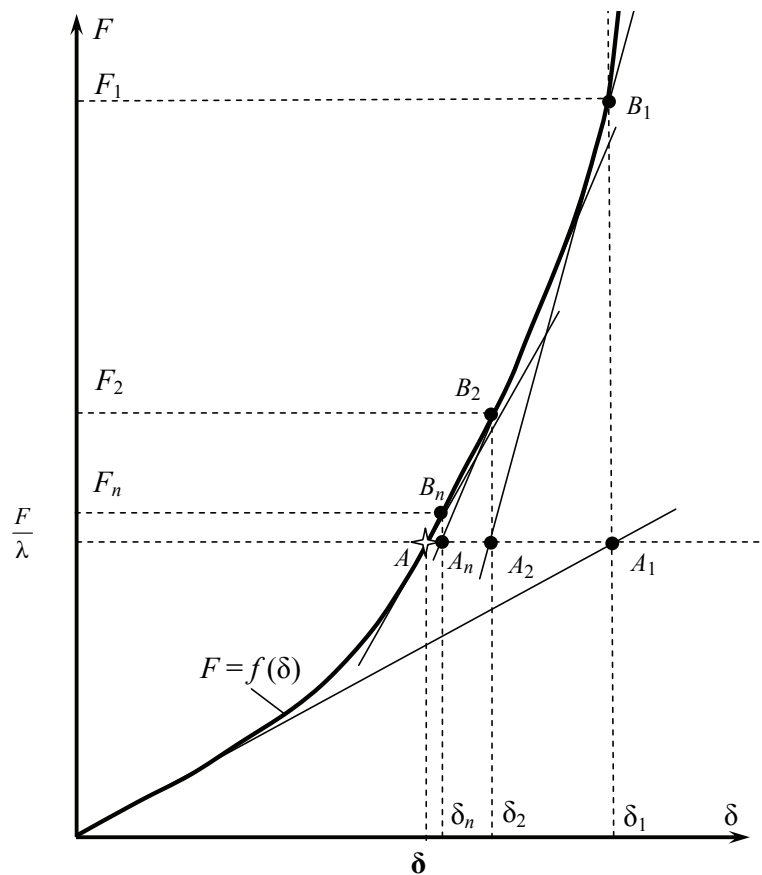


Рис. 3 Итерационный алгоритм

Второе приближение по перемещениям определяется согласно [5] с поправкой на характер исследуемой кривой ($F = f(\delta)$):

$$\delta_2 = \delta_1 - \frac{(F_1 - \lambda F)}{[K(q^1)]}. \quad (18)$$

Полученное решение соответствует точке A_2 на рис. 3. Процесс последовательных решений уравнений с процедурой уточнения матрицы жесткости продолжается до тех пор, пока разница между результатами решения, полученными на этапах $n-1$ и n не будет достаточно малой. Критерием сходимости итерационного процесса установлено условие $(\delta_i - \delta_{i-1})/\delta_i \leq \varepsilon$, где $\varepsilon = 10^{-6}$ – заданная точность решения.

Затем уравнение (16) решается снова уже для следующего интервала нагрузки, при этом учитываются перемещения, рассчитанные на предыдущем этапе, и изображенные на рис. 3 итерационные процедуры повторяются. Такой цикл происходит для каждого интервала нагрузки.

Эксперимент. С целью апробации разработанной методики расчета геометрически нелинейных конструкций поставлена серия натурных экспериментов. Для этого использовалась лабораторная установка, схема которой приведена на рис. 4. Установка включала в себя объект исследования 1 – стальную струну диаметром $d = 0,4$ мм и длиной $l = 0,5$ м, один конец которой неподвижно закреплялся. Другой конец, проходящий через специальное зажимное устройство 2, прикреплялся к динамометру 3. После создания требуемой силы натяжения второй конец также фиксировался посредством устройства 2. Затем на расстоянии 0,2 м от зажимного устройства подвешивался груз весом P и измерялась величина прогиба v .

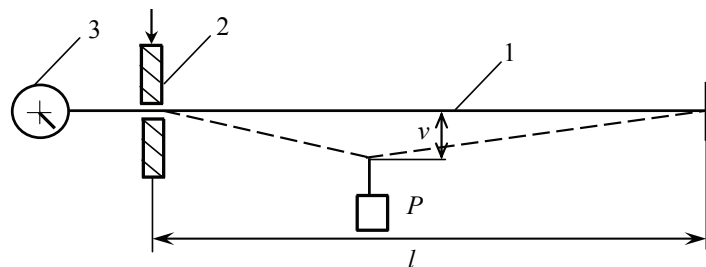


Рис. 4 Экспериментальная установка

Измерения проведены при различных силах натяжения струны и весах подвешиваемого груза. Результаты эксперимента сведены в табл. 1.

Здесь же представлены данные расчета, полученные для струны с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Для оценки влияния геометрической нелинейности на величину прогиба в табл. 1 даны значения v , рассчитанные без учета эффекта изменения силы натяжения. Анализ представленных данных позволяет сделать следующий вывод. Учет нелинейности нецелесообразен, если отношение начальной силы натяжения к величине поперечной нагрузки $\alpha = \frac{N_0}{P} > 30$.

Если $\alpha \leq 10$ величина ошибки составляет уже 12–20 %, а по мере уменьшения этого отношения ошибка становится все более заметной. При $\alpha \leq 0,7$ ошибка

достигает 300 %. Таким образом, пренебрежение эффектами геометрической нелинейности в ряде случаев может привести к недопустимо большим ошибкам.

Таблица 1

Величина начальной силы натяжения $N_0 = 20$ Н			
Вес груза P , [Н]	Расчет v , 10^{-2} м		Эксперимент v , 10^{-2} м
	Учет изменения силы натяжения	Без учета изменения силы натяжения	
2,9	0,90	1,12	0,9
4,9	1,27	1,86	1,2
12,8	2,10	4,84	2,0
14,7	2,25	5,59	2,2
17,7	2,45	6,70	2,4
19,6	2,56	7,45	2,5
29,4	3,03	11,17	3,0
Величина начальной силы натяжения $N_0 = 50$ Н			
2,9	0,55	0,58	0,5
4,9	0,86	0,96	0,8
12,8	1,73	2,51	1,7
14,7	1,88	2,89	1,9
17,7	2,095	3,47	2,0
19,6	2,22	3,86	2,3
29,4	2,73	5,78	2,8
Величина начальной силы натяжения $N_0 = 100$ Н			
2,9	0,32	0,32	0,3
4,9	0,52	0,53	0,5
12,8	1,23	1,39	1,2
14,7	1,38	1,60	1,5
17,7	1,59	1,92	1,7
19,6	1,72	2,14	1,8
29,4	2,25	3,21	2,3

Для наглядного отображения полученных данных расчетно-экспериментальные результаты представлены на рис. 5. Сопоставление расчетно-экспериментальных результатов показывает их хорошее соответствие.

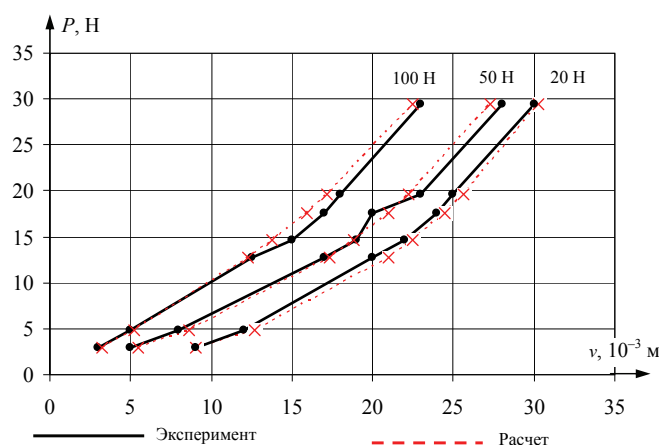


Рис. 5 Результаты расчетно-экспериментальных исследований

Список литературы

1. **Иванов, С. П.** К расчету на устойчивость физически нелинейных пластин в упругой среде / С. П. Иванов, Е. С. Иванова, О. Г. Иванов, Ю. В. Лоскутов, С. В. Шлычков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 175–182.
2. **Лукаш, П. А.** Основы нелинейной строительной механики / П. А. Лукаш. – М. : Стройиздат, 1978. – 204 с.
3. **Постнов, В. А.** Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л. : Судостроение, 1974. – 344 с.
4. **Куликов, Ю. А.** Механические колебания дек музыкальных инструментов / Ю. А. Куликов, С. В. Шлычков. – Йошкар-Ола : Изд-во МарГТУ, 2006. – 188 с.
5. **Ливсли, Р.** Матричные методы строительной механики / Р. Ливсли. – М. : Стройиздат, 1980. – 224 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООСТВОЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНО-ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Приводится математическая модель, описывающая динамику многоствольных артиллерийских систем, предназначенных для импульсного вдавливания недеформируемых тел в грунт. На основе численных экспериментов показана эффективность применения многоствольных откатных систем в строительстве.

Введение

Работа посвящена анализу эффективности многоствольной откатной артиллерийской системы (импульсно-тепловой машины) (рис. 1), проводимому на основе математической модели ее действия, при застреливании недеформируемых тел в грунт способом импульсного вдавливания, соответствующим одновременному движению строительного элемента (СЭ) – недеформируемого тела, в грунте и канале ствола. В монографии [1] были показаны преимущества этого способа по сравнению со свободным застреливанием СЭ в грунт для одноствольных орудий.

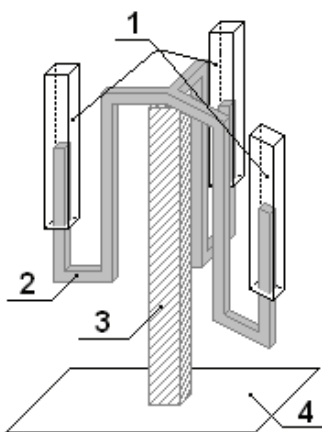


Рис. 1 Схема многоствольного орудия

Работает многоствольное орудие следующим образом (рис. 1). В стволы 1 вставляются поршни-забойники 2, посредством которых энергия горящих пороховых зарядов, находящихся в стволах, действует на строительный элемент 3, вдавливая его в грунт 4. Во время выстрела стволы откатываются вверх.

Модель импульсного вдавливания

Существующие теории внутренней баллистики одноствольных систем не позволяют рассчитывать динамические характеристики импульсного вдавливания из многоствольных орудий, поэтому необходимо построить для них собственную математическую модель.

Введем следующие обозначения: n – количество стволов в системе; χ – характеристика формы пороха; α – коэф. пов. пороховых газов; Δ – плот-

ность заряжания; f , I_p , δ – сила, импульс и плотность пороха соответственно; Ψ – относительная часть сгоревшего заряда; ω – масса заряда; W_0 , W_Ψ – полный и свободный объем каморы к моменту сгорания в ней части заряда Ψ ; p_0 – давление форсирования строительного элемента; s_a , m_a , l_a , v_a – площадь поперечного сечения, масса, абсолютный путь и скорость СЭ соответственно; L_n – длина канала ствола; S_p , M_p , L_p , V_p – площадь поперечного сечения канала ствола, масса, абсолютный путь и скорость откатных частей орудия соответственно; θ – показатель адиабаты пороховых газов без единицы; g – ускорение свободного падения; a , b , c – постоянные коэффициенты, характеризующие силу сопротивления грунта прониканию; d_a – диаметр поперечного сечения строительного элемента.

Согласно работе [2] определим силу сопротивления грунта F в следующем виде: $F = s_a \left(av_a^2 + b \right) + c\pi d_a l_a$.

При выводе основных уравнений баллистики вдавливания для системы откатных артиллерийских орудий введем следующие допущения:

1. Стволы артиллерийской системы опущены вниз под углом 90° к поверхности грунта, что обеспечивает вертикальное заглубление строительного элемента.

2. Стволы без нарезов, т.е. рассматриваются только гладкоствольные системы, которые обеспечивают движение строительного элемента в грунте без вращения относительно его продольной оси.

3. Условия заряжания всех стволов одинаковы.

4. Технические характеристики всех стволов одинаковы.

5. Не учитывается работа, затрачиваемая на перемещение газов и заряда. Это допустимо, если учесть, что массы зарядов в рассматриваемых случаях чрезвычайно малы по сравнению с массами откатных частей пушки и строительного элемента, и, следовательно, кинетические энергии зарядов будут настолько малы по сравнению с кинетическими энергиями откатных частей и строительного элемента, что ими можно пренебречь.

6. Давление газов на дно канала каждого ствола и на концы балок поршня-забойника одинаковы.

7. Используется зерненный порох с постоянной поверхностью горения.

8. Закон горения пороха выражается формулой $u = u_1 p$, где $u_1 = \text{const}$, p – давление пороховых газов.

9. Состав продуктов горения не меняется, величины силы пороха f и коволюма пороховых газов α постоянны.

10. Показатель адиабаты пороховых газов $\theta + 1$ принимается постоянным и равным некоторому среднему значению.

11. Предполагается, что строительный элемент стоит на месте, пока давление газов не достигает величины давления форсирования p_0 .

12. Движение строительного элемента по каналу ствола рассматривается до момента прохождения конца балок поршня-забойника через дульные срезы стволов.

13. Растяжение стенок стволов при выстреле и прорыв пороховых газов через зазоры между балками поршня-забойника и каналами стволов не учитываются.

14. Сила сопротивления грунта описывается гладкой функцией от времени, модуль производной которой ограничен не очень большим числом.

15. Застреливаемый строительный элемент и поршень-забойник – недеформируемые тела.

Известно [3], что расчет параметров предварительного периода выстрела сводится к определению относительной части сгоревшего заряда до начала движения строительного элемента. Согласно [3] эта величина удовлетворяет соотношению

$$\Psi_0 = \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta} \right) / \left(\frac{f}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\delta} \right).$$

Для того чтобы строительный элемент начал двигаться поступательно, необходима энергия пороховых газов, которая позволит ему освободиться от креплений, связывающих его со стволами. Сила, необходимая для этого, определяет величину $S_p p_0$, зная которую, можно найти значение давления форсирования p_0 .

На основании работы [1] легко показать, что энергия пороховых газов E , выделяемая при горении зарядов в стволах, описывается соотношением

$$E = n \left\{ \frac{f\omega}{\theta} \Psi - \frac{p [W_\Psi + S_p (L_p + L_a)]}{\theta} \right\}.$$

Энергия пороховых газов при импульсном вдавливании строительных элементов в грунт расходуется на передачу следующих энергий и выполнения работ:

1) кинетической энергии E_1 откатывающимся вертикально вверх стволам:

$$E_1 = n \frac{M_p V_p^2}{2};$$

2) кинетической энергии E_2 строительному элементу:

$$E_2 = \frac{m_a v_a^2}{2};$$

3) работы E_3 , выполняемой при преодолении силы тяжести откатывающихся вертикально вверх стволов:

$$E_3 = n M_p g L_p;$$

4) работы E_4 , выполняемой при преодолении силы сопротивления грунта во время движения в нем СЭ:

$$E_4 = \int_0^{l_a} F(v_a, x) dx.$$

Кроме того, сила тяжести сама выполняет работу E_5 :

$$E_5 = m_a g l_a.$$

На основании закона сохранения энергии можно написать отношение

$$E = \sum_{i=1}^4 E_i - E_5 ,$$

которое в развернутом виде будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} n \left\{ \frac{f\omega}{\theta} \Psi - \frac{p[W_\Psi + S_p(L_p + L_a)]}{\theta} \right\} = \\ = n \frac{M_p V_p^2}{2} + \frac{m_a v_a^2}{2} + n M_p g L_p + \int_0^{l_a} F(v_a, x) dx - m_a g l_a . \end{aligned} \quad (1)$$

Известно [1], что для трубчатого зернового пороха процесс горения заряда описывается формулами

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\chi}{I_p} p = \Gamma p, \quad \Gamma = \frac{\chi}{I_p}, \quad \frac{dL_\Psi}{dt} = -\frac{W_0}{S_p} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \Gamma p = -a_1 \Gamma p, \quad a_1 = \frac{W_0}{S_p} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right).$$

С учетом последних соотношений и справедливости цепочки равенств

$$\frac{d}{dt} \int_0^{l_a} F(v_a, x) dx = \frac{d}{dt} \int_0^t F(v_a, l_a) v_a dt = F(v_a, l_a) v_a ,$$

дифференцируя обе части (1) по параметру «время» t и деля на n , получим соотношение

$$\begin{aligned} \frac{f\omega}{\theta} \Gamma p - \frac{dp}{dt} \frac{S_p(L_\Psi + L_p + l_a)}{\theta} - \frac{p S_p}{\theta} (-a_1 \Gamma p + V_p + v_a) = \\ = M_p V_p \frac{dV_p}{dt} + M_p g V_p + \frac{1}{n} \left(m_a v_a \frac{dv_a}{dt} - m_a g v_a + F(v_a, l_a) v_a \right). \end{aligned} \quad (2)$$

На основании второго закона Ньютона можем написать

$$\begin{aligned} m_a \frac{dv_a}{dt} = n p S_p + m_a g - F(v_a, l_a), \\ M_p \frac{dV_p}{dt} = p S_p - M_p g. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя соотношения (3) в равенство (2) и выражая производную dp/dt , получим формулу, определяющую скорость изменения давления в канале каждого ствола:

$$\frac{dp}{dt} = \left(a_1 \Gamma p^2 + \frac{f\omega \Gamma p}{S_p} - p(1 + \theta)(V_p + v_a) \right) / (L_\Psi + L_p + l_a).$$

Для первого периода выстрела свободный объем заснарядного пространства определяется зависимостью [3]

$$W_{\Psi} = W_0 - \frac{\omega}{\delta} - S_p a_1 \Psi, \text{ т.е. } L_{\Psi} = \frac{W_{\Psi}}{S_p}.$$

Таким образом, согласно термодинамической теории выстрела, учитывающей конструктивные особенности многоствольной установки, уравнения, описывающие первый период выстрела, примут вид

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} &= \frac{a_1 \Gamma p^2 + \frac{f \omega \Gamma p}{S_p} - p(1+\theta)(V_p + v_a)}{L_{\Psi} + L_p + l_a}; \\ \frac{dv_a}{dt} &= \frac{npS_p + m_a g - F(v_a, l_a)}{m_a}, \quad \frac{dl_a}{dt} = v_a; \\ \frac{dV_p}{dt} &= \frac{pS_p - M_p g}{M_p}, \quad \frac{dL_p}{dt} = V_p; \\ L_{\Psi} &= \frac{W_0 - \frac{\omega}{\delta}}{S_p} - a_1 \Psi, \quad \frac{d\Psi}{dt} = \Gamma p. \end{aligned} \quad (4)$$

Начальные условия для системы дифференциальных уравнений (4) следующие:

$$p|_{t=0} = p_0, \quad \Psi|_{t=0} = \Psi_0, \quad W_{\Psi}|_{t=0} = W_0, \quad L_p|_{t=0} = 0, \quad V_p|_{t=0} = 0, \quad l_a|_{t=0} = 0, \quad v_a|_{t=0} = 0.$$

Система уравнений для второго периода выстрела, при котором пороховые газы расширяются адиабатически, примет вид

$$\begin{aligned} p &= p_k \frac{(L_1 + L_{pk} + l_{ak})^{1+\theta}}{(L_1 + L_p + l_a)^{1+\theta}}; \\ \frac{dv_a}{dt} &= \frac{npS_p + m_a g - F(v_a, l_a)}{m_a}, \quad \frac{dl_a}{dt} = v_a; \\ \frac{dV_p}{dt} &= \frac{pS_p - M_p g}{M_p}, \quad \frac{dL_p}{dt} = V_p. \end{aligned} \quad (5)$$

Начальными условиями для уравнений (5) будут конечные значения, полученные при решении задачи Коши для первого периода выстрела, т.е.

$$p|_{t=0} = p_k, \quad L_p|_{t=0} = L_{pk}, \quad V_p|_{t=0} = V_{pk}, \quad l_a|_{t=0} = l_{ak}, \quad v_a|_{t=0} = v_{ak}.$$

Известно [2, 4], что для одноствольных систем для численного решения задачи расчета внутрибаллистических характеристик с достаточной степенью точности можно применять метод Эйлера или метод Рунге-Кутты второго порядка с шагом интегрирования 10^{-6} с, при этом относительное отклонение между решениями, полученными этими методами, составляет 0,3 %, а сред-

нее относительное отклонение расчетных данных от экспериментальных – 8,6 %. Эти же методы и шаг интегрирования применим для решения систем уравнений (4) и (5).

Анализ численных экспериментов

Для исследования внутрибаллистических процессов многоствольной строительной системы приведем результаты численных экспериментов и проанализируем зависимости некоторых динамических характеристик от количества стволов в этой системе.

Будем рассматривать глинистый грунт с консистенцией 0,3. Динамические характеристики этого грунта приведены в работе [1].

При расчетах примем следующие исходные технические характеристики орудий и условия заряжания: $\omega = 0,3$ кг, $I_n = 250000$ Па·с, $W_0 = 0,001024$ м³, $p_0 = 2$ МПа, $d_a = 0,168$ м, $m_a = 360$ кг, $D_p = 0,17$ м, $M_p = 3600$ кг, $L_n = 2,345$ м.

Анализ численных экспериментов показывает, что поведение основных внутрибаллистических характеристик многоствольных систем аналогично поведению этих характеристик для одноствольных орудий [4, 5], поэтому остановимся на рассмотрении лишь тех показателей многоствольных пушек, которые существенно зависят от количества стволов строительной импульсно-тепловой машины.

Увеличение количества стволов приводит к росту конечного заглубления строительного элемента (рис. 2). При этом рост заглубления постепенно замедляется и, начиная с некоторого количества стволов системы, практически останавливается. По сравнению с одноствольными системами [1], применение многоствольных увеличивает заглубление почти в 2 раза.

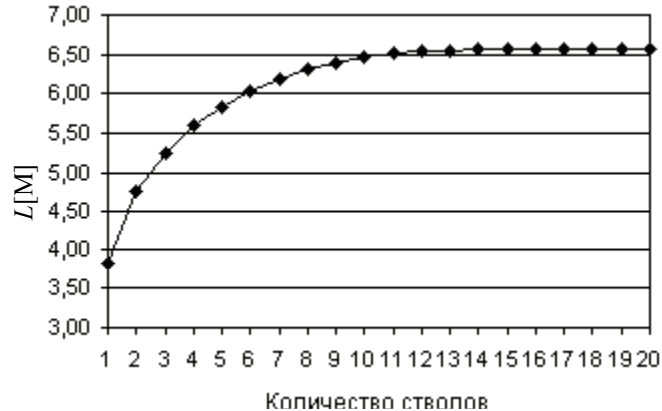


Рис. 2 Зависимость конечного заглубления строительного элемента L от количества стволов

На рис. 3, 4 приведены графики зависимости максимального давления в канале ствола P и максимальной скорости отката V от количества стволов системы соответственно.

Рисунки 3, 4 показывают, что увеличение количества стволов снижает максимальное давление в канале ствола и максимальную скорость свободного отката системы. Эти характеристики, как известно [1], являются основными

ограничениями при использовании строительных артиллерийских установок для застреливания СЭ в грунт. Анализ рис. 3, 4 позволяет сделать вывод о том, что для многоствольных систем можно использовать больший заряд по сравнению с одноствольным орудием, увеличивая конечное заглубление строительного элемента в грунт, одновременно уменьшая дульную скорость отката артиллерийской системы и максимальное давление в канале каждого ствола.

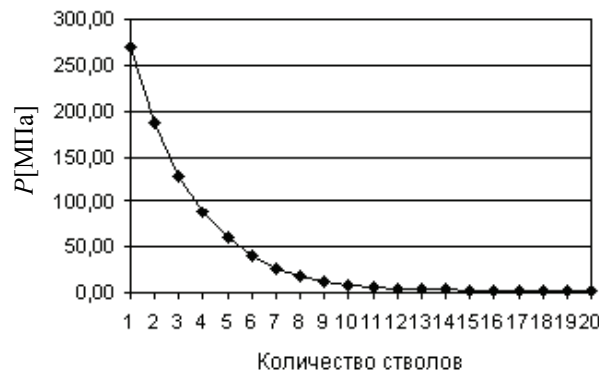


Рис. 3 Зависимость максимального давления в канале ствола P от количества стволов

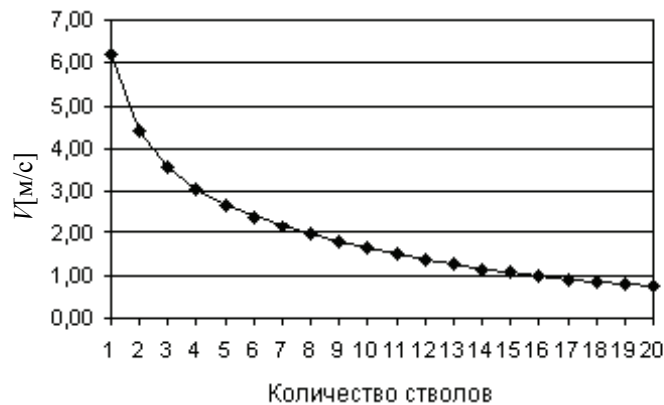


Рис. 4 Зависимость максимальной скорости отката V от количества стволов

Оптимизационные задачи

Для выбора оптимальных параметров заряжания, обеспечивающих максимальное заглубление строительного элемента в грунт, необходимо решить оптимизационную задачу и с учетом допустимого максимального давления $P_{\max}$ в каналах стволов и допустимой скорости свободного отката $V_{\max}$ найти:

$$\max_{\omega, W_0, I_n} L(\omega, W_0, I_n) \text{ при ограничениях } p \leq p_{\max}, V_p \leq V_{\max}, \quad (6)$$

где L – конечное заглубление строительного элемента, а процесс импульсного вдавливания описывается системами уравнений (4), (5).

Численные эксперименты с использованием [6] показали, что применение, например, трехствольной системы позволяет увеличить конечное заглубление строительного элемента на 55 % по сравнению с одноствольной пушкой.

Аналогично [1] введем соотношение, определяющее коэффициент полезного действия многоствольной установки:

$$\text{КПД} = \frac{\int_0^{l_a} F(v_a, l_a) dL + \frac{m_a v_a^2}{2}}{\frac{f \omega n}{\theta}} \cdot 100 \%.$$

Увеличение количества стволов в установке до некоторого порогового значения приводит к росту КПД (рис. 5). Коэффициент полезного действия является важным показателем эффективности орудия. Поэтому необходимо знать, как влияет выбор максимального КПД в качестве критерия оптимизации в обратной задаче внутренней баллистики вместо другого критерия оптимизации – наибольшего заглубления строительного элемента в грунт.

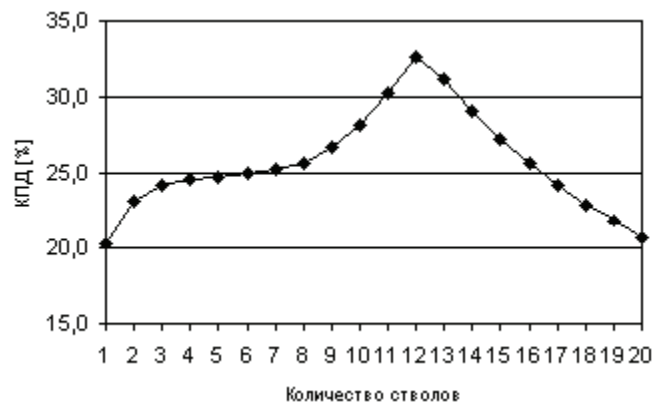


Рис. 5 Зависимость КПД от количества стволов

Найдем при заранее заданном заглублении $\max_{\omega, W_0, I_n}$ КПД при следующих ограничениях:

$$p \leq p_{\max}, V_p \leq V_{\max}. \quad (7)$$

Рассмотрим многоимпульсное погружение строительного элемента в грунт [4], где для определения оптимальных условий заряжания каждого импульсного вдавливания-выстрела будем решать только задачи (6) или (7).

Ниже приводится сравнение результатов решения обратной задачи внутренней баллистики при различных критериях оптимизации. В обоих случаях обратная задача решалась для трехствольной системы с требуемым максимальным заглублением строительного элемента равным 10 м для решения задачи (6) и тем же требуемым заглублением для решения задачи (7), допустимыми максимальным давлением в каналах стволов 250 МПа и скоростью свободного отката 6,5 м/с.

Несмотря на большее количество произведенных импульсов-выстрелов, суммарная масса необходимого пороха при выборе условий заряжания, обеспечивающих максимальный КПД (задача (7)), на 35 % меньше по сравнению с общей массой заряда, обеспечивающей наибольшее заглубление при каждом выстреле (задача (8)) (рис. 6).

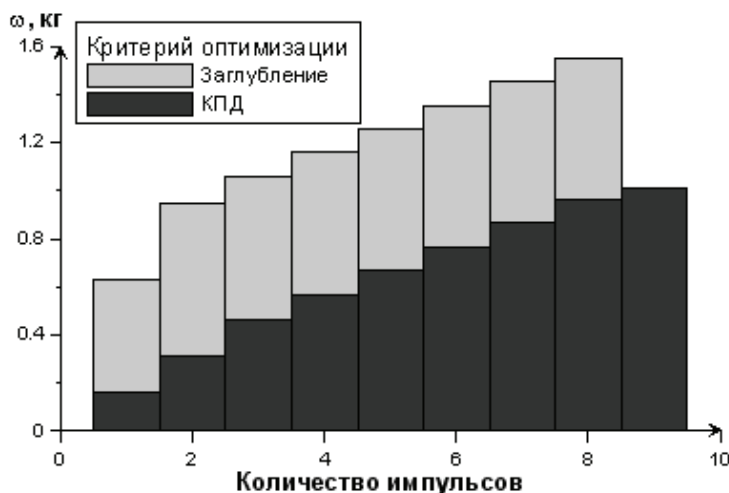


Рис. 6 Зависимости общих затрат пороха от номера импульса в решении обратной задачи внутренней баллистики при различных критериях оптимизации.

Таким образом, если подготовка каждого импульса-выстрела при многоимпульсном погружении не связана с большими временными либо материальными затратами, то целесообразно при застреливании строительных элементов в грунт подбирать массу заряда, обеспечивающего максимальный коэффициент полезного действия при каждом импульсном вдавливании.

Заключение

В результате исследований установлено, что применение многоствольных артиллерийских установок может значительно повысить эффективность использования строительных импульсно-тепловых машин и существует оптимальное количество стволов, обеспечивающее максимальный коэффициент полезного действия всей системы.

Список литературы

1. **Пенский, О. Г.** Импульсно-тепловые машины в строительстве / О. Г. Пенский. – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 2000. – 96 с.
2. **Пенский, О. Г.** Термодинамическая оценка применения специальных импульсно-тепловых машин в строительстве / О. Г. Пенский. – Пермь : Изд-во Перм. гос. ун-та, 2003. – 106 с.
3. **Серебряков, М. Е.** Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет / М. Е. Серебряков. – М. : Оборонгиз, 1962. – 704 с.
4. **Маланин, В. В.** Сопряженные модели динамики импульсно-тепловых машин и проникания недеформируемых тел в сплошную среду / В. В. Маланин, О. Г. Пенский. – Пермь : Изд-во Пермск. гос. ун-та, 2007. – 200 с.
5. **Пенский, О. Г.** Сопряженные модели проникания твердых тел / О. Г. Пенский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 151–161.
6. **Проничев, А. А.** Решение прямой и обратной задач внутренней баллистики многоствольных строительных откатных артиллерийских систем «Строительная баллистика» : программа / А. А. Проничев – свидетельство об отраслевой регистрации разработки №10153 от 11.03.2008. Номер государственной регистрации 502008005.

АННОТАЦИИ

И н ф о р м а т и к а , в ы ч и с л и т е л ь н а я т е х н и к а и у п р а в л е н и е

УДК 681.324

Зинкин, С. А.

Элементы технологии иерархического концептуального моделирования и реализации систем и сетей хранения и обработки данных / С. А. Зинкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 3–15.

Предлагаются модели и методы, которые могут быть использованы в качестве основы создания новой объектно-ориентированной сетевой технологии моделирования и проектирования распределенных систем хранения и обработки данных на основе согласованных взаимодействий объектов через общее пространство – коммуникационную среду или общее пространство информационных объектов.

УДК 004.4'244:004.434

Дубинин, В. Н.

Графотрансформационный подход к синтезу формальных моделей систем функциональных блоков IEC 61499 / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 16–26.

Рассмотрен подход на основе преобразований графов для синтеза формальных моделей систем функциональных блоков IEC 61499. В качестве модельной формы предлагаются арифметические NCES-сети. Процесс синтеза представляется как поток моделей. С помощью метамodelей описываются языки представления систем функциональных блоков и модульных арифметических NCES-сетей на основе графов. Рассмотрены правила трансформации графов для некоторых этапов синтеза.

УДК 681.3.07

Леохин, Ю. Л.

Анализ информационной структуры корпоративной сети / Ю. Л. Леохин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 27–40.

Рассмотрены проблемы анализа информационной структуры корпоративной сети. Сформулированы основные принципы анализа структуры. Решены задачи описания структуры и вычисления характеристик структуры: интенсивностей потоков данных между узлами сети, нагрузка на узлы и структурообразующее оборудование сети.

УДК 681.324(03)

Сафонова, И. Е.

Методы формирования и принятия проектных решений в системах автоматизированного проектирования корпоративных компьютерных сетей / И. Е. Сафонова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 41–49.

Рассматриваются методы формирования, оптимизации и принятия проектных стратегий при автоматизированном проектировании корпоративных компьютерных сетей. Представлен интерактивный метод последовательных уступок для задач оптимизации концептуального проектного решения в условиях определенности исходной информации и предложено решение проблемы выбора базового проекта сети в условиях неопределенности исходной информации.

УДК 681.51

Ерыпалова, М. Н.

Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний / М. Н. Ерыпалова, В. Ф. Беккер, А. В. Затонский, Ю. П. Киринов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 50–57.

Предложена методика адаптивной идентификации позиционных систем автоматизированного управления по автоколебаниям технологических параметров. На примере объекта первого порядка произведены аналитический расчет и имитационное моделирование, показывающие эффективность методики.

УДК 005.6(075.8)

Мещеряков, В. А.

Система диагностики системы менеджмента качества стратегического уровня управления университетом / В. А. Мещеряков, Г. В. Суровицкая, В. В. Чугунова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 58–66.

Решена задача структурирования функции качества в процессах диагностики системы менеджмента качества стратегического уровня управления университетом. Разработана процессная система диагностики системы менеджмента качества (стратегический уровень). Приведен пример оценки устойчивости системы диагностики системы менеджмента качества университета, выявлена корреляция процессов диагностики.

УДК 621.3:681.3

Слепцов, Н. В.

Повышение качества эволюционно-генетических вычислений с помощью разделения оценки и масштабирования / Н. В. Слепцов, С. В. Щербакова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 67–79.

Рассмотрены вопросы эффективной реализации генетических вычислений. Предлагаются методы улучшения качества популяций с помощью средств управления видообразованием множества исходных решений с учетом параметров решаемой задачи.

**Электроника, измерительная
техника и радиотехника**

УДК 537.874.6

Макеева, Г. С.

Математическое моделирование и электродинамический расчет эффективных параметров магнитных наноматериалов / Г. С. Макеева, О. А. Голованов, М. В. Савченкова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 80–85.

Разработана математическая модель распространения электромагнитных волн в гиромагнитных наноструктурированных средах на основе декомпозиционного подхода с применением автономных блоков (АБ) с магнитными нановключениями и каналами Флоке. Получено характеристическое уравнение для определения постоянных распространения волн в трехмерной периодической решетке, включающее матрицу рассеяния (дескриптор) АБ.

Рассчитаны постоянные распространения правополяризованной и левополяризованной волн (при продольном подмагничивании) и обыкновенной и необыкновенной волн (при поперечном подмагничивании), и комплексные значения эффективных электромагнитных параметров магнитного наноматериала.

УДК 621.3.087.92

Ашанин, В. Н.

ΣТ-АЦП с промежуточной интегрально-импульсной модуляцией / В. Н. Ашанин, И. С. Баулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 86–93.

Приводится описание разработанного интегрирующего АЦП на основе преобразователя напряжения в интервал времени с предварительной интегрально-импульсной модуляцией. В нем реализованы основные принципы Σ-АЦП: передискретизация, шейпинг шума квантования, цифровая фильтрация и децимация. С целью снижения требований к этим процедурам проводится предварительная минимизация погрешности от краевых эффектов. Приводятся результаты экспериментального анализа влияния сетевой помехи на точность преобразования при реализации различных цифровых фильтров.

УДК 517.392

Бойков, И. В.

Применение гиперсингулярных интегральных уравнений к численному моделированию электрического вибратора / И. В. Бойков, Д. В. Тарасов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 94–106.

Предложены численные методы решения уравнений Поклингтона и Галлена, являющихся основным аппаратом моделирования электрических вибраторов конечной длины. Получен новый класс гиперсингулярных интегральных уравнений и проведено сравнение результатов моделирования электрических вибраторов гиперсингулярными интегральными уравнениями и уравнениями Поклингтона и Галлена.

УДК 621.317

Башкиров, О. В.

Исследование возможности измерения частоты электросети методом «трех мгновенных значений сигнала» / О. В. Башкиров, П. П. Першенков, Е. А. Тюрин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 107–115.

Рассматриваются вопросы измерения частоты сетевого напряжения по трем мгновенным значениям при наличии высших гармоник. Построена модель измерения частоты сетевого напряжения в системе MathLab. Сделаны выводы о возможности применения метода на практике.

УДК 004.031:005.934.2:004.5:316.4.063.34:64.011.56:001.51:303.732.4

Журавлев, С. П.

Построение интеграционных связей в комплексной системе безопасности / С. П. Журавлев, П. П. Журавлев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 116–125.

Рассматриваются вопросы построения комплексных систем безопасности. Предлагаются формализованные методы поиска и построения интеграционных связей подсистем комплексной системы безопасности согласно критерию максимальной эффективности комплексной системы безопасности. Приведены примеры использования предложенных методов.

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.746.66.001.57

Вайнер, Н. И.

Моделирование теплообмена при непрерывной разливке стали с применением внутренних охладителей / Н. И. Вайнер, В. Д. Тутарова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 126–131.

Рассматриваются причины образования поверхностных дефектов в непрерывнолитых заготовках и возможность их устранения. На основании анализа результатов математического моделирования процесса затвердевания металла делается вывод о целесообразности применения в непрерывной разливке внутренних охладителей различного размера и температуры нагрева с целью предотвращения образования термических трещин и, как следствие, повышения качества выпускаемой стали.

УДК 621.357.8

Тарасенко, Ю. П.

Разрушение рабочих лопаток турбины вследствие высокотемпературной усталости / Ю. П. Тарасенко, О. Б. Бердник, И. Н. Царева, Л. А. Кривина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 132–138.

Изучено состояние материала лопатки турбины низкого давления газоперекачивающего агрегата, разрушенной в процессе эксплуатации. Установлено, что разрушение произошло в результате образования и развития трещины. Трещина возникла в процессе эксплуатации в результате охрупчивания границ зерен металла вследствие развития процессов высокотемпературной усталости.

УДК 669:620.193/197

Виноградов, С. Н.

Исследование коррозионной стойкости конструкционных сталей в пластовой воде / С. Н. Виноградов, В. И. Волчихин, Е. В. Ширина, А. С. Мещеряков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 139–144.

Статья содержит описание коррозионных испытаний низкоуглеродистой, хромистой и нержавеющей сталей в пластовой воде. Приведены исследования скорости коррозии низкоуглеродистой и хромистой сталей в зависимости от катодного потенциала защиты. На основании полученных результатов установлено, что катодная электрохимическая защита данных сталей в пластовой воде является эффективной.

УДК 539.3:534.1

Шлычков, С. В.

Расчет геометрически нелинейных конструкций методом конечных элементов / С. В. Шлычков, С. П. Иванов, С. Г. Кузовков, Ю. В. Лоскутов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 145–152.

Представлены результаты численных исследований деформирования гибкой струны под действием поперечной статически приложенной нагрузки. Задача решается методом конечных элементов. В рамках плоской задачи получены расчетные соотношения для вычисления матриц жесткости и геометрической жесткости конструкции. Построен итерационный алгоритм расчета, учитывающий нелинейную зависимость между прикладываемой нагрузкой и перемещением точек конструкции.

УДК 532.546; 533.6.011

Проничев, А. А.

Моделирование многоствольных строительных импульсно-тепловых машин / А. А. Проничев, О. Г. Пенский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4. – С. 153–161.

Приводится математическая модель, описывающая динамику многоствольных артиллерийских систем, предназначенных для импульсного вдавливания недеформируемых тел в грунт. На основе численных экспериментов показана эффективность применения многоствольных откатных систем в строительстве.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ашанин Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и транспортного электрооборудования Пензенского государственного университета.

Баулин Игорь Сергеевич – аспирант Пензенского государственного университета.

Баширов Олег Владимирович – аспирант Пензенского государственного университета.

Беккер Вячеслав Филиппович – кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского государственного технического университета.

Бердник Ольга Борисовна – научный сотрудник Нижегородского филиала Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.

Бойков Илья Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей и прикладной математики Пензенского государственного университета.

Вайнер Никита Игоревич – ассистент кафедры вычислительной техники и прикладной математики Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.

Виноградов Станислав Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химического машиностроения и электрохимического производства Пензенского государственного университета.

Волчихин Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, ректор Пензенского государственного университета.

Вяткин Валерий Владимирович – доктор технических наук, профессор факультета электронных и компьютерных наук Оклендского университета (г. Окленд, Новая Зеландия).

Голованов Олег Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математики и начертательной геометрии Пензенского артиллерийского инженерного института им. Главного маршала артиллерии Н. Н. Воронова.

Дубинин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Пензенского государственного университета.

Ерыпалова Мария Николаевна – ассистент кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского государственного технического университета.

Журавлев Павел Петрович – старший преподаватель кафедры персональной электроники Международного университета природы, общества и человека (г. Дубна).

Журавлев Сергей Павлович – аспирант Международного университета природы, общества и человека (г. Дубна).

Затонский Андрей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского государственного технического университета.

Зинкин Сергей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Пензенского государственного университета.

Иванов Сергей Павлович – доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов и прикладной механики Марийского государственного технического университета (г. Йошкар-Ола).

Кириин Юрий Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов Березниковского филиала Пермского государственного технического университета.

Кривина Людмила Александровна – научный сотрудник Нижегородского Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.

Кузовков Сергей Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики Марийского государственного технического университета (г. Йошкар-Ола).

Леохин Юрий Львович – кандидат технических наук, профессор кафедры информационно-коммуникационных технологий Московского государственного института электроники и математики.

Лоскутов Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики Марийского государственного технического университета (г. Йошкар-Ола).

Макеева Галина Степановна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем Пензенского государственного университета, действительный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.

Мещеряков Анатолий Семенович – доктор педагогических наук, профессор, заведующий кафедрой профессиональной педагогики и психологии Пензенского государственного университета.

Мещеряков Виктор Афанасьевич – кандидат технических наук, профессор, первый проректор Пензенского государственного университета.

Пенский Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики Пермского государственного университета.

Периенков Петр Петрович – кандидат технических наук, профессор кафедры физики Пензенского государственного университета.

Пронищев Алексей Александрович – аспирант Пермского государственного университета.

Сафонова Ирина Евгеньевна – доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий Московского государственного института электроники и математики.

Слепцов Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и организации производства Пензенского государственного университета.

Суровицкая Галина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, начальник отдела планирования и анализа Управления системой качества Пензенского государственного университета.

Тарасенко Юрий Павлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией «Трибофизика» Нижегородского филиала Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.

Тарасов Дмитрий Викторович – ассистент кафедры высшей и прикладной математики Пензенского государственного университета.

Тутарова Власта Диляуровна – кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова.

Тюрин Евгений Александрович – аспирант Пензенского государственного университета.

Царева Ирина Николаевна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Нижегородского филиала Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН.

Чугунова Варвара Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры дискретной математики Пензенского государственного университета.

Ширина Елена Викторовна – инженер кафедры химического машиностроения и электрохимического производства Пензенского государственного университета.

Шлычков Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики Марийского государственного технического университета (г. Йошкар-Ола).

Щербакова Светлана Владимировна – доцент кафедры русского языка как иностранного Института международных отношений Пензенского государственного университета.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows версий не выше 2003.

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru, дискета 3,5", CD-диск) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах.

Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Тип файла в электронном виде – RTF.

Статья обязательно должна сопровождаться индексом УДК, а также краткой аннотацией.

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными надписями.

Формулы в тексте статьи выполняются в редакторе формул Microsoft Word Equation, версия 3.0 и ниже. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования необходимо соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Номер источника указывается в квадратных скобках. В списке указывается:

- для книг – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц;
- для журнальных статей, сборников трудов – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, выпуск, страницы;
- для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название издания, время и место проведения конференции, город, издательство, год, страницы.

В конце статьи допускается указание наименования программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

К материалам статьи должна прилагаться информация для заполнения учетного листа автора: фамилия, имя, отчество, место работы и должность, ученая степень, ученое звание, адрес, контактные телефоны, e-mail.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Рукопись, полученная редакцией, не возвращается.

Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- **информатика**
- **вычислительная техника**
- **управление**
- **электроника**
- **измерительная техника**
- **радиотехника**
- **машиностроение**
- **машиноведение**

Стоимость одного номера журнала – 250 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 56-34-96, тел.: 36-82-06, 56-47-33; E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку на первое полугодие 2009 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы» тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2009 г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата «____» _____ 2009 г.