

**Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН**

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

***Выпуск 74
Июль 2018***

**СБОРНИК
ТРУДОВ**

ISSN 1819-2467

Регистрационный номер Эл. №ФС77-44158 от 09 марта 2011 г.

Москва – 2018

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова

**УПРАВЛЕНИЕ
БОЛЬШИМИ
СИСТЕМАМИ**

СБОРНИК ТРУДОВ

Выпуск 74

Москва – 2018

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Академики РАН: Васильев С.Н., Емельянов С.В., Куржанский А.Б., Федосов Е.А., Черноушко Ф.Л.; члены-корреспонденты РАН: Желтов С.Ю., Каляев И.А., Пархоменко П.П., Попков Ю.С.; д-ра техн. наук: Кузнецов О.П., Кульба В.В., Лотоцкий В.А., Павлов Б.В., Поляк Б.Т., Рутковский В.Ю.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: член-корр. РАН Новиков Д.А. **Зам. главного редактора:** д-р физ.-мат. наук Губко М.В. **Отв. секретарь:** канд. техн. наук Калимулина Э.Ю. **Редактор:** канд. техн. наук Квинто Я.И.

Д-ра техн. наук: проф. Алескеров Ф.Т. (ГУ ВШЭ), проф. Алчинов А.И. (ИПУ РАН), проф. Андриевский Б.Р. (ИПМ РАН), проф. Афанасьев В.Н. (МИЭМ), проф. Бахтадзе Н.Н. (ИПУ РАН), проф. Бурков В.Н. (ИПУ РАН), проф. Вишневский В.М. (ИПУ РАН), Галаев А.А. (ИПУ РАН), д-р физ.-мат. наук проф. Ерешко Ф.И. (ВЦ РАН), д-ра техн. наук Зоркальцев В.И. (ИСЭМ СО РАН), проф. Калашников А.О. (ИПУ РАН), проф. Калянов Г.Н. (ГУ ВШЭ), проф. Каравай М.Ф. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Клочков В.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, Коргин Н.А. (ИПУ РАН), проф. Курдюков А.П. (ИПУ РАН), д-ра физ.-мат. наук, проф. Кушнер А.Г., проф. Лазарев А.А. (МФТИ), д-ра техн. наук: проф. Лебедев В.Г. (ИПУ РАН), проф. Мандель А.С. (ИПУ РАН), д-р биол. наук проф. Михальский А.И., д-р физ.-мат. наук, проф. Непейвода Н.Н. (ИПС РАН), д-р экон. наук, проф. Нижегородцев Р.М. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук: проф. Орлов А.И. (МГТУ), д-ра физ.-мат. наук: проф. Рапопорт Л.Б. (ИПУ РАН), проф. Райгородский А.М. (МГУ), проф. Савватеев А.В. (РЭШ), д-ра техн. наук: проф. Самуйлов К.Е. (РУДН), проф. Сидельников Ю.В. (МАИ), Совлуков А.С. (ИПУ РАН) д-ра физ.-мат. наук: проф. Соловьев С.Ю. (МГУ), проф. Угольницкий Г.А. (ЮФУ), проф. Уткин В.А. (ИПУ РАН), проф. Хоботов Е.Н. (МГТУ), д-ра физ.-мат. наук: доцент Чеботарев П.Ю. (ИПУ РАН), проф. Чхартишвили А.Г. (ИПУ РАН), проф. Щербаков П.С. (ИПУ РАН).

РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДАКЦИОННЫЕ СОВЕТЫ

Арзамас – д-р физ.-мат. наук проф. Пакшин П.В. **Волгоград** – д-ра физ.-мат. наук: проф. Воронин А.А., проф. Лосев А.Г. (ВолГУ); **Воронеж** – д-р техн. наук, проф. Баркалов С.А., д-р физ.-мат. наук, проф. Головинский П.А. (ВГАСУ), д-р техн. наук, проф. Подвальный С.Л. (ВГТУ); **Иркутск** – академик РАН Бычков И.В., д-р физ.-мат. наук, проф. Лакеев А.В. (ИДСТУ СО РАН); **Казань** – д-р физ.-мат. наук, проф. Маликов А.И., д-р техн. наук, проф. Сиразетдинов Р.Т. (КГТУ-КАИ); **Липецк** – д-ра техн. наук: проф. Погодаев А.К., Сараев П.В. (ЛГТУ); **Самара** – д-ра экон. наук: проф. Богатырев В.Д., проф. Гераськин М.И., д-р техн. наук, проф. Засканов В.Г. (СГАУ); **Петрозаводск** – д-р физ.-мат. наук, проф. Мазалов В.В., д-р техн. наук, доц. Печников А.А. (ИПМИ КарНЦ РАН); **Санкт-Петербург** – д-р физ.-мат. наук: проф. Петросян Л.А. (СПбГУ), д-р техн. наук проф. Фуртат И.Б. (ИПМ РАН); **Старый Оскол** – д-р техн. наук, проф. Еременко Ю.И. (СТИ).

Адрес редакции: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

Адрес в интернете: ubs.mtas.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Математическая теория управления

Голосовский М.С.

Алгоритм локальной настройки систем нечёткого логического вывода типа Мамдани с сохранением интерпретабельности продукционных правил..... 6

Сетевые модели в управлении

Шейпак С.И.

Достижение консенсуса многокомпонентной системой в условиях переменной топологии и аддитивного случайного шума 23

Управление техническими системами и технологическими процессами

**Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Самарцев А.А.,
Иващенко В.А., Кушников В.А., Богомолов А.С.,
Филимонюк Л.Ю.**

Математическая модель динамики развития пожара в помещениях 42

Управление подвижными объектами и навигация

Грошев А.В., Фролова О.А.

Помехоустойчивый адаптивно-робастный алгоритм контроля данных в комплексной инерциально-спутниковой навигационной системе

63

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И., Федянин Д.Н.

Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта)

I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов

81

УДК 004.021
ББК 32.813.55

АЛГОРИТМ ЛОКАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ НЕЧЁТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ТИПА МАМДАНИ С СОХРАНЕНИЕМ ИНТЕРПРЕТАБЕЛЬНОСТИ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ

Голосовский М. С.¹

*(Государственный научно-исследовательский
испытательный институт военной медицины
Минобороны России, Москва)*

Приведён алгоритм локальной подстройки систем Мамдани с сохранением интерпретабельности продукционных правил нечёткого логического вывода, что позволяет решить проблему настройки экспертной системы на основании статистических данных или на основании информации о точном (чётком) значении выхода системы для определённого значения входов.

Ключевые слова: нечёткий логический вывод, системы Мамдани, системы Сугено, нечёткое моделирование, локальная настройка.

1. Введение

Теория нечётких множеств как инструмент, позволяющий учитывать неопределённость, а также применять выражения естественного языка для описания данных, предложен Л. Заде в 1965 году [4]. В 1993 году Б. Коско в доказал теорему [13], согласно которой система нечёткого логического вывода типа Мамдани равномерно аппроксимирует функцию $f: X \rightarrow Y$, если множество X компактно и функция f непрерывна. Теорема ут-

¹ Михаил Сергеевич Голосовский, младший научный сотрудник (golosovskiy@yandex.ru).

верждает, что для любой константы $\varepsilon > 0$, можно подобрать такую систему нечёткого логического вывода $F(x)$, использующую центроидный метод дефаззификации, что будет выполняться условие

$$(1) \quad |F(x) - f(x)| < \varepsilon, \forall x \in X, \varepsilon > 0.$$

Следствием теоремы определяется необходимость выполнения соотношения для получения заданной точности ε [2]:

$$(2) \quad |y_i - y_{i+1}| < \frac{\varepsilon}{2g - 1},$$

где g – число перекрытий функций принадлежности входных переменных. Согласно этому условию для систем типа Мамдани увеличение числа пересекающихся функций в термножествах входных переменных требует уменьшения расстояния между ядрами функций принадлежности выходных переменных. В работе [14] приведено доказательство, что число правил вывода должно быть не меньше числа экстремумов аппроксимируемой функции. Тем не менее доказательства обоснования минимального числа правил вывода, обеспечивающих заданную точность аппроксимации для нечётких систем типа Мамдани, нет. Одними из наиболее распространённых методов синтеза систем нечёткого вывода типа Мамдани являются экспертные методы [1, 3, 5-9, 16]. Это обусловлено тем, что применение лингвистических переменных и правил вывода предполагает моделирование человеческого мышления и использование экспертных суждений в терминах «ЕСЛИ, ТО» в качестве источника знаний о процессе функционирования моделируемой системы [15]. Но использование только экспертных методов накладывает ограничение на размер системы в связи с тем, что средний человек способен одновременно оперировать 4-9 единицами информации [17] и эксперту весьма сложно представить нечёткую модель, содержащую более двух входов, и со сложной зависимостью выхода от входов. Для настройки моделей в условиях, когда получение информации от экспертов затруднено или невозможно, применяют способы настройки системы на основе имеющейся статистической информации [12]. Одними из

наиболее часто применяемых инструментов подстройки модели являются нейронные сети или генетические алгоритмы. Но нейросетевые и генетические алгоритмы дают хорошие результаты при условии наличия большой по объёму обучающей выборки. При этом как класс систем нечеткого логического вывода, больше ориентированный на точность соответствия выходного значения моделируемой зависимости, выделяются системы типа Сугено. Системы Сугено первого порядка, использующие в качестве заключений правил константы, содержат меньшее число требуемых для подстройки параметров, чем аналогичные системы типа Мамдани, за счёт чего активно используются в адаптивных системах, как пример в нейро-нечётких моделях [8]. В связи с чем в статье предлагается выполнить преобразование системы типа Мамдани к системе типа Сугено.

Отдельный вопрос в части настройки систем Мамдани касается сохранения интерпретабельности продукционных правил [10]. В работе [11] проведено исследование подходов к определению термина «интерпретабельность» и способов её измерения для систем нечёткого логического вывода. В этой работе интерпретабельность определена как способность системы выразить своё поведение в понятном для восприятия человеком виде. Поскольку определение субъективное, для его уточнения выделены основные два направления:

– интерпретабельность, определяемая сложностью модели – выражающаяся в числе продукционных правил, числе входных переменных и числе функций принадлежности в термножествах: уменьшение указанных характеристик упрощает интерпретацию модели экспертом;

– семантическая интерпретабельность – выражающаяся в сохранении семантической корректности значений переменных, функций принадлежности и их взаимоотношений, а также последовательностью и различимостью продукционных правил.

В предложенном алгоритме при настройке модели число выходных и входных переменных, а также число продукционных правил изменяться не будет. Поэтому под сохранением интерпретабельности модели и продукционных правил будет пониматься сохранение семантической интерпретабельности.

С учётом введённых ограничений, разработан следующий алгоритм настройки систем Мамдани с сохранением интерпретабельности настраиваемой модели:

Шаг 1. Выполнение прямого преобразования системы типа Мамдани к системе типа Сугено.

Шаг 2. Выполнение точной локальной подстройки системы нечёткого логического вывода типа Сугено.

Шаг 3. Выполнение обратного преобразования системы типа Сугено к системе типа Мамдани.

Шаг 4. Применение лингвистических модификаторов к лингвистическим значениям изменённых в процессе настройки функций принадлежности выходной переменной.

2. Прямое и обратное приведение систем типа Мамдани к системам типа Сугено

Рассмотрим класс систем Мамдани, которые возможно быстро приводить к системам типа Сугено и обратно без потери в точности вычислений и сохранением интерпретабельности модели. Для этого наложим на систему Мамдани следующие ограничения:

- у каждого продукционного правила только одна функция принадлежности в заключении;
- функции принадлежности в терм-множествах лингвистических переменных из заключений продукционных правил симметричны, ширина и форма их одинакова;
- дефаззификация производится по методу центра тяжести.

Если использовать симметричные функции принадлежности в заключении правил, как показано на рис. 1, то вычисление результирующего значения y по методу центра тяжести:

$$(3) \quad y = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x\mu(x)}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu(x)},$$

где x – переменная, соответствующая выходной лингвистической переменной, $\mu(x)$ – функция принадлежности нечёткого множества, можно свести к формуле

$$(4) \quad y = \frac{\sum_{i=1}^N w_i b_i}{\sum_i w_i},$$

где y – результирующее значение системы нечёткого логического вывода; w_i – степень истинности заключения i -го правила; b_i – ядро функции принадлежности – точка, в которой значение функции принадлежности равно 1: $\mu(b_i) = 1$. Формула (4) соответствует выводу для систем Сугено первого порядка, при котором значение функции заключения равно константе: $f(x) = const$. Для рассматриваемой системы значение константы заключения правила в системе Сугено совпадает со значением ядра функции принадлежности системы Мамдани, что делает возможным прямой и обратный переход от системы одного типа к системе другого типа.

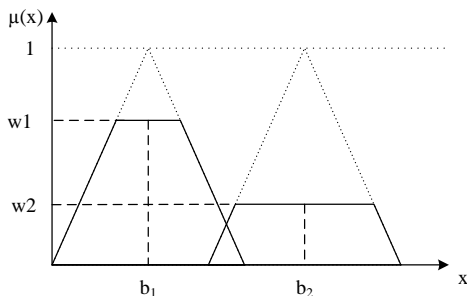


Рис. 1. Срабатывание заключений правил нечёткого логического вывода для двух функций

3. Точная локальная подстройка системы нечёткого логического вывода типа Сугено

В системе нечёткого вывода типа Сугено формирование результирующего значения осуществляется по формуле

$$(5) \quad y = \frac{w_1 b_1 + w_2 b_2 + \dots + w_n b_n}{w_1 + w_2 + \dots + w_n}.$$

В случае если параметры входных переменных системы нечёткого логического вывода остаются неизменными, степень истинности заключения каждого правила для фиксированного чёткого входного значения w_i останется неизменной. Тогда результирующее значение y зависит только от значения заключения каждого правила b_i , причём одному и тому же значению y могут соответствовать разные наборы значений b_i . Если в системе только два правила, то эти наборы значений будут лежать на некоторой прямой, которая задаётся общим уравнением прямой:

$$(6) \quad w_1 b_1 + w_2 b_2 - y(w_1 + w_2) = 0.$$

В системе из трёх правил наборы значений будут лежать на плоскости, заданной общим уравнением:

$$(7) \quad w_1 b_1 + w_2 b_2 + w_3 b_3 - y(w_1 + w_2 + w_3) = 0.$$

В случае для системы из n правил наборы возможных значений для точечной подстройки системы будут лежать на $(n - 1)$ -мерной фигуре или $(n - 1)$ -мерном аналоге двумерной плоскости, заданной общим уравнением:

$$(8) \quad w_1 b_1 + w_2 b_2 + w_3 b_3 + \dots + w_n b_n - y(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n) = 0.$$

Пусть для заданного значения входных переменных системой нечёткого логического вывода формируется выходное значение y , обусловленное заданным значением параметров (b_1, b_2, \dots, b_n) . Требуется скорректировать это значение параметров таким образом, чтобы получить значение новое значение y . Так как количество вариантов подстройки, как комбинаций точек, лежащих на фигуре, заданной общим уравнением по формуле (8), бесконечно, то в качестве критерия выберем кратчайшее расстояние от точки на текущей поверхности до точки на новой поверхности – перпендикуляр от текущей точки до поверхности с новым состоянием системы. В этом случае каждый новый параметр будет рассчитан по следующей формуле:

$$b'_i = b_i - w_i \frac{w_1 b_1 + w_2 b_2 + w_3 b_3 + \dots + w_n b_n - y(w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n)}{w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + \dots + w_n^2} =$$

$$(9) \quad = b_i - w_i \frac{\sum_{i=1}^n w_i b_i - y \sum_{i=1}^n w_i}{\sum_{i=1}^n w_i^2}.$$

В соответствии с формулой (9), форма функций принадлежности на скорость подстройки модели не влияет. Форма функций принадлежности будет оказывать влияние только на форму поверхности нечёткого логического вывода.

Рассмотрим результаты работы формулы подстройки на примере системы Сугено с одним входом и одним выходом для различного числа входных функций принадлежности (возьмём 5, 11, 21 шт.), и двух видов типов ФП – гауссовых, и треугольных. Графическое представление терм-множеств входных переменных приведено на рис. 2. Область определения входной переменной $[0, 10]$.

Для каждой входной ФП в системе задано правило нечёткого логического вывода (НЛВ). При начальных настройках система НЛВ реализует зависимость $y(x) = 2$ для любого x , принадлежащего интервалу $[0, 10]$. С применением рассматриваемого алгоритма подстройка системы будет производиться до целевого значения $y(x_0) = 7$, где x_0 – специальная точка, выбранная на области определения. Зависимость чёткого значения выхода системы НЛВ (выходное значение системы) от четких значений входов системы НЛВ (входные значения системы) носит название поверхности нечёткого логического вывода. Рассмотрим следующие зависимости подстройки системы. Первая – зависимость подстраиваемой поверхности НЛВ от количества ФП входной переменной, вторая – зависимость вида поверхности НЛВ от выбора x (в точке экстремума ФП, в точке пересечения ФП, в промежуточной точке между точкой экстремума и точкой пересечения ФП). Графики поверхностей НЛВ настроенных систем с числом функций принадлежности (*MF – membership function*) 5, 11, 21 представлены на рис. 3.

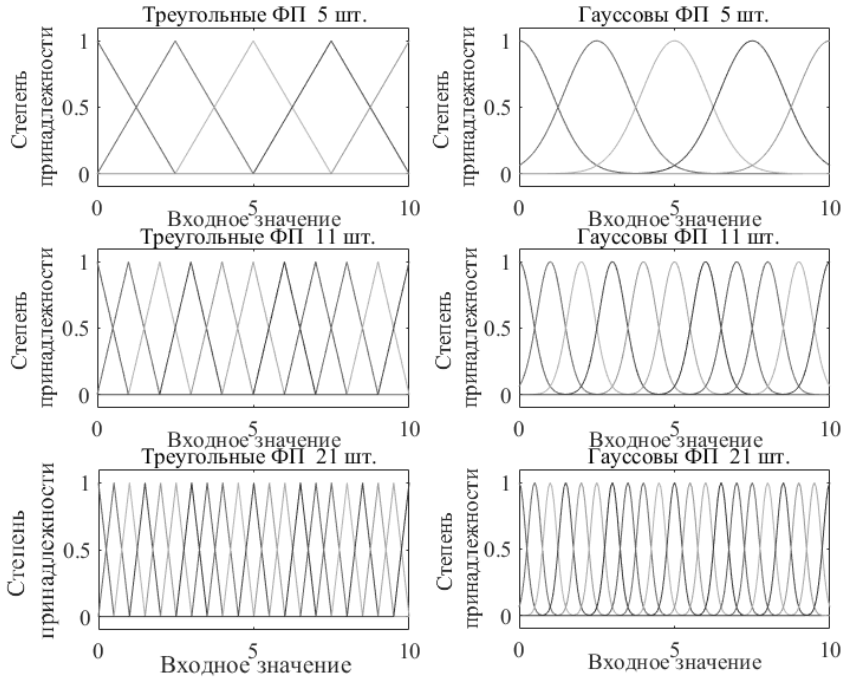


Рис. 2. Графическое представление терм-множеств входных переменных

На основании полученных графиков можно сделать следующий вывод: чем больше функций принадлежности у входной переменной, тем шире затрагиваемая область изменений. У гауссовых функций принадлежности, в связи с тем, что они являются ФП с бесконечным носителем, изменения могут затрагивать всю область значения выходной переменной. При этом поверхности гауссова типа дают гладкие поверхности нечёткого логического вывода. Для более независимой и локальной подстройки системы нечёткого логического вывода требуется увеличение числа функций принадлежности. Но большое число ФП увеличивает количество правил. В этом случае можно создавать системы с неравномерным распределением ФП и увеличивать количество функций

принадлежности в точках, где велико число подстраиваемых элементов и высока сложность подстраиваемой поверхности.

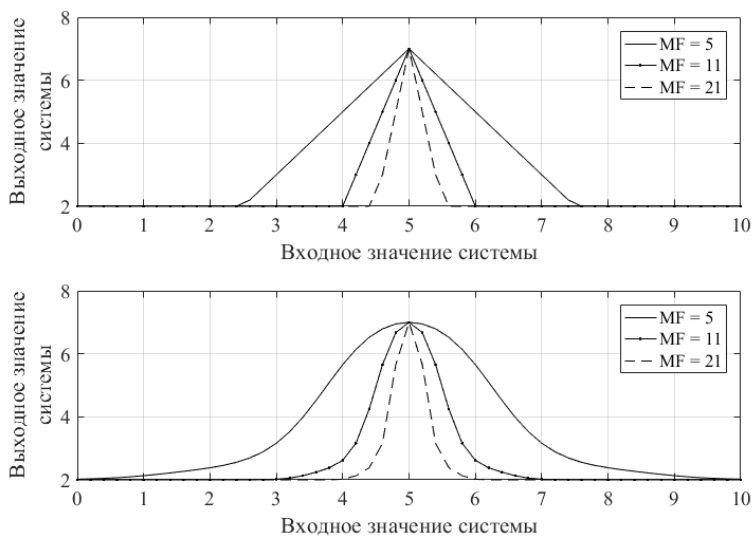


Рис. 3. Графики поверхностей НЛВ настроенных систем с разным числом ФП

На основании полученных графиков можно сделать следующий вывод: чем больше функций принадлежности у входной переменной, тем шире затрагиваемая область изменений. У гауссовых функций принадлежности, в связи с тем, что они являются ФП с бесконечным носителем, изменения могут затрагивать всю область значения выходной переменной. При этом поверхности гауссова типа дают гладкие поверхности нечёткого логического вывода. Для более независимой и локальной подстройки системы нечёткого логического вывода требуется увеличение числа функций принадлежности. Но большое число ФП увеличивает количество правил. В этом случае можно создавать системы с неравномерным распределением ФП и увеличивать количество функций принадлежности в точках, где велико число подстраиваемых элементов и высока сложность подстраиваемой поверхности.

На рис. 4 представлены графики функций поверхности НЛВ с 11 ФП у входной переменной, с подстроенным значением $y(x_0) = 7$ при $x_0 = 5$, $x_0 = 4,75$, $x_0 = 4,5$.

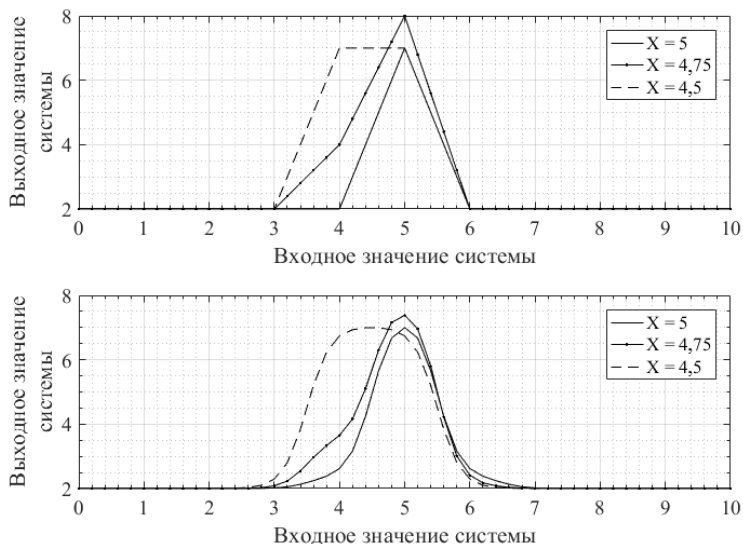


Рис. 4. Графики функций поверхности НЛВ с подстроенным значением $y(x_0) = 7$ при $x_0 = 5$, $x_0 = 4,75$, $x_0 = 4,5$

При подстройке в точке максимума ФП входной переменной и в точке пересечения ФП входных переменных при равномерном распределении ФП график поверхности НЛВ имеет симметричную форму. Это связано с тем, что участок входных ФП будет также симметричным. Отличие для подстройки в точке экстремума ФП или в точке пересечения двух соседних ФП будет заключаться в ширине пика результирующей поверхности, который будет шире для точки пересечения ФП, так как в этом случае происходит равномерная подстройка выходного значения системы для двух входных ФП. При промежуточном положении входного значения симметрия нарушается. И в этом случае максимальное четкое значение, получаемое на выходе системы НЛВ, может принимать значения большие, чем значение системы, под которое происходит подстройка.

4. Применение лингвистических модификаторов для корректировки значений лингвистической переменной функций заключения

Решение задачи сохранения интерпретабельности модели получим за счёт введения понятия опорных функций принадлежности и лингвистического модификатора, позволяющего определить лингвистическое значение новой функции принадлежности относительно ближайших соседних опорных функций. Опорные функции принадлежности задаются для выходной лингвистической переменной таким образом, что расстояние между ядрами любых двух соседних функций принадлежности одинаковое. Рекомендуется задавать минимум 5 опорных ФП. Это обусловлено тем, что для интерпретации модели требуется указать по одной ФП с каждого края интервала области определения лингвистической переменной, одну ФП – посередине интервала области определения и по одной ФП – между центральной и граничными ФП. Для каждой опорной функции принадлежности задаются лингвистические значения, относительно которых будет определяться новое лингвистическое значение ФП, полученной в результате подстройки системы.

Пусть $M_i = \mu_i(x)$ – опорная функция принадлежности выходной переменной с номером $i \in [1, N]$, где N – число опорных функций принадлежности. Зададим лингвистическую переменную «Лингвистический модификатор» и далее рассмотрим переменную, состоящую из пяти треугольных функций принадлежности $M_{\text{лм}j} = \mu_{\text{лм}j}(x)$, где $j \in [1, 5]$ – номер функции принадлежности. Число 5 выбрано для примера и может быть увеличено. Основное ограничение: одна функция принадлежности должна быть в центре интервала и по одной функции принадлежности – по краям интервала. Область определения переменной «Лингвистический модификатор» задана на интервале $(-\Delta x, \Delta x)$, где Δx – расстояние между ядрами двух соседних опорных функций принадлежности. Графическое представление лингвистической переменной «Лингвистический модификатор» приведено на рис. 5.

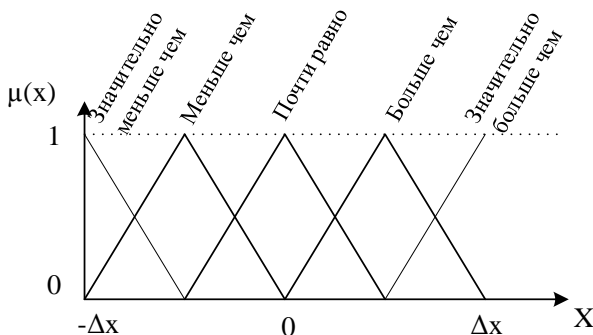


Рис. 5. Графическое представление лингвистической переменной «Лингвистический модификатор»

M' – функция принадлежности заключения одного из правил системы, у которой положение ядра относительно оси X настроено с использованием оптимизирующего алгоритма. Вычисление нового лингвистического значения функции принадлежности M' с использованием лингвистического модификатора производится по следующему алгоритму:

Шаг 1. Если ядро b' функции принадлежности M' совпадает с ядром i -й опорной функции принадлежности b_i , то функции принадлежности M' присваивается лингвистическое значение ФП M_i . Работа алгоритма останавливается. Иначе производится переход на Шаг 2.

Шаг 2. Вычисляется расстояние между ядрами двух соседних опорных функций принадлежности:

$$(10) \Delta x = b_2 - b_1.$$

Шаг 3. Производится поиск двух соседних опорных ФП M_i и M_{i+1} , между ядрами которых расположено ядро подстроенной функции принадлежности. Для чего проверяется условие

$$(11) b_i < b' < b_{i+1}.$$

Шаг 4. Вычисляется смещение ядра подстроенной функции принадлежности относительно ядер ФП M_i и M_{i+1} :

$$(12) x_i = b' - b_i,$$

$$(13) x_{i+1} = b' - b_{i+1}.$$

Шаг 5. Производится отбор функций принадлежности лингвистического модификатора, у которых значение максимально для входных аргументов x_i и x_{i+1} :

$$(14) M'_1 = \mu(x) \mid \max \mu_{\text{ЛМ}_j}(x_i),$$

$$(15) M'_2 = \mu(x) \mid \max \mu_{\text{ЛМ}_j}(x_{i+1}).$$

Шаг 6. Вычисляются модифицированные значения опорных функций принадлежности $md(M)$ как прибавление лингвистического значения ФП модификатора к лингвистическому значению опорной ФП:

$$(16) md(M_i) = \text{lingv}(M'_1) + \text{lingv}(M_i),$$

$$(17) md(M_{i+1}) = \text{lingv}(M'_2) + \text{lingv}(M_{i+1}).$$

Поскольку в формулах (15) и (16) производится сложение строчковых лингвистических значений, то свойство коммутативности операции сложения нарушается, и важно сохранять порядок следования элементов операции.

Шаг 7. Вычисляется результирующее лингвистическое значение ФП M' как модифицированные лингвистические значения опорных функций принадлежности, объединённые союзом «И»:

$$(18) \text{lingv}(M') = md(M_i) \text{ И } md(M_{i+1}).$$

Рассмотрим пример выполнения алгоритма. На рис. 6 изображено графическое представление лингвистической переменной «Сложность», используемой в качестве выходной переменной системы нечёткого логического вывода. Название переменной приведено для примера и может интерпретироваться как сложность решения некоторого набора задач, для оценки которых настраивается система НЛВ. Опорные функции принадлежности: M_1 – очень маленькая, M_2 – маленькая, M_3 – средняя, M_4 – большая, M_5 – очень большая – показаны сплошной линией и равномерно распределены по области определения $[0, 1]$. M' – функция принадлежности заключения одного из правил системы, у которой положение ядра относительно оси X настроено с использованием оптимизирующего алгоритма.

В соответствии с формулой (10), расстояние между соседними функциями принадлежности $\Delta x = 0,25$. Опорные функции принадлежности, между которыми расположена ФП M' : M_2 – маленькая, M_3 – средняя. В соответствии с (12) и (13), вы-

численные значения смещения ядер $x_i = 0,17$ и $x_{i+1} = -0,08$. На основании полученных значений смещения ядер отобраны функции принадлежности: $M'_1 =$ «Больше чем» и $M'_2 =$ «Меньше чем», при помощи которых получены модифицированные значения опорных функций принадлежности $md(M_2) =$ «Больше чем маленькая» и $md(M_2) =$ «Меньше чем средняя». Результирующее лингвистическое значение M' , в соответствии с (18), будет представлено как: $M' =$ «больше чем маленькая и меньше чем средняя».

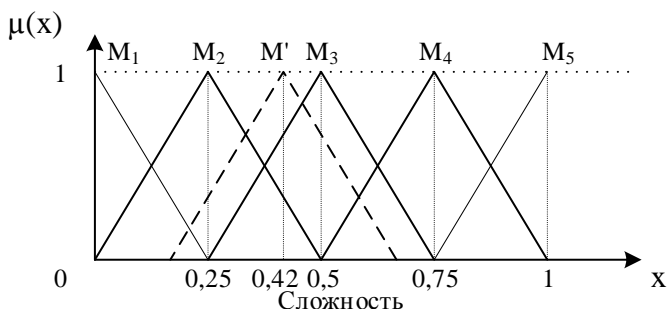


Рис. 6. Графическое представление лингвистической переменной «Сложность» с опорными функциями и новой функцией M'

5. Заключение

Предложенный алгоритм позволяет решить задачу точечной подстройки систем типа Мамдани с сохранением интерпретабельности правил нечёткого вывода. Ограничением алгоритма является необходимость использования систем типа Мамдани с симметричными функциями принадлежности в выходной переменной. Дополнительно формулу (9) можно использовать для локальной подстройки систем нечёткого вывода типа Сугено первого порядка.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-06-00486).

Литература

1. БОГОМОЛОВ А.В. *Использование лингвистических переменных и методов обработки экспертной информации для автоматизированного распознавания ранних стадий нарушения функционального состояния человека* // Информационные технологии. – 2000. – №8. – С. 12–18.
2. БОРИСОВ В.В., КРУГЛОВ В.В., ФЕДУЛОВ А.С. *Нечёткие модели и сети*. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
3. ГОЛОСОВСКИЙ М.С. *Применение системы на основе нечёткой логики в задачах управления проектами по разработке программного обеспечения* // Материалы X международной научной конференции «Инновационное развитие общества: условия, противоречия, приоритеты» / Под ред. А.В. Семенова. – 2014. – С. 400–404.
4. ЗАДЕ Л. *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений*. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
5. КРУГЛОВ В.В. *Сравнение алгоритмов Мамдани и Сугено в задаче аппроксимации функции* // Математическая морфология: электронный математический и медико-биологический журнал. – 2001. – №4. – С. 69–76.
6. КУДИНОВ Ю.И., КЕЛИНА А.Ю. *Методы синтеза и настройки нечетких ПИД регуляторов Мамдани* // Информационные технологии. – 2012. – №6 (приложение). – 32 с.
7. ПАКЛИН Н.Б. *Адаптивные модели нечеткого вывода для идентификации нелинейных зависимостей в сложных системах*: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ижевск, 2004. – 20 с.
8. ПЕГАТ А. *Нечёткое моделирование и управление. 2-е издание*. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
9. СИЛИЧ В.А., СИЛИЧ М.П., АКСЕНОВ С.В. *Алгоритм построения нечеткой системы логического вывода Мамдани, основанный на анализе плотности обучающих примеров* // Доклады ТУСУР. – 2013. – №3(29). – С. 76–82.

10. ШТОВБА С.Д., МАЗУРЕНКО В.В., ТЫЛЕЦ Р.О. *Информационная технология нечеткой идентификации для синтеза точных, компактных и интерпретабельных баз знаний* // Computer Sciences and Telecommunications. – 2016. – №1(47). – С. 8–22.
11. GACTO M., ALCALA R., Herrera F. *Interpretability of linguistic fuzzy rule - based systems: An overview of interpretability measures* // Information Sciences. – 2011. – №20. – Vol. 181, – P. 4340–4360.
12. GANG F. *Analysis and synthesis of fuzzy control systems: a model-based approach (automation and control engineering)*. – CRC Press, 2017. – 299 p.
13. KOSKO B. *Fuzzy systems as universal approximators* // IEEE Transactions on Computers. – 1994. – Vol. 43, №11. – P. 1329–1333.
14. KOSKO B. *Global stability of generalized additive fuzzy systems* // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part C: Applications and Reviews. – 1998. – Vol. 28, №3. – P. 441–452.
15. MAISTROU A.I., BOGOMOLOV A.V. *Technology of automated medical diagnostics using fuzzy linguistic variables and consensus ranking methods* // IFMBE Proc. of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering: Diagnostic and Therapeutic Instrumentation, Clinical Engineering. Cycle: "World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering: Diagnostic and Therapeutic Instrumentation, Clinical Engineering". – Munich, 2009. – P. 38–41.
16. MANENTIA F., ROSSIA F., GORYUNOV A., DYADIK A., KOZIN K., NADEZHDIR I., MIKHALEVICH S. *Fuzzy adaptive control system of a non-stationary plant with closed-loop passive identifier* // Resource-Efficient Technologies. – 2015. – Vol. 1, №1. – P. 10–18.
17. MILLER G.A., *The magical number seven plus or minus two: some limits on our capacity for processing information* // The Psychological Review. – 1956. – №63. – P. 81–97.

MAMDANI FUZZY INFERENCE SYSTEM LOCAL TUNING ALGORITHM WITH THE SAVING INTERPRETATION CAPABILITY OF INFERENCE RULES

Mikhail Golosovskiy, State Research Institute of the Military Medicine of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Moscow, junior research fellow (golosovskiy@yandex.ru).

Abstract: The article presents the Mamdani systems local tuning algorithm with saving interpretation capability of inference rules, which allows us to solve the problem of expert system configuration on the basis of statistical data or on the basis of information on the exact (crisp) value of the system output for certain input values. Restrictions were set on the conclusion rules for applying direct and inverse transformation of the Mamdani-type system to the Sugeno-type system. In this article a formula for local tuning of the Sugeno-type system is proposed. This formula calculates the values of the fuzzy logical rules consequences based on the construction of the perpendicular bisector between n -dimensional surfaces. Surfaces equations are based on the values of the conclusions of each rule before and after tuning. The Sugeno-type system is transformed back to the Mamdani-type system after local tuning. The saving of interpretation capability of inference rules is ensured by the introduction of a linguistic modifier. The modifier allows us to set the new language values to rules consequences by adding the degree of change based on reference linguistic values.

Keywords: fuzzy inference system, Mamdani, Sugeno fuzzy systems, fuzzy modeling, local setting.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Э.Ю. Калимулиной.

*Поступила в редакцию 17.11.2017.
Опубликована 31.07.2018.*

УДК 519.1 + 519.2
ББК 22.17

ДОСТИЖЕНИЕ КОНСЕНСУСА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ТОПОЛОГИИ И АДДИТИВНОГО СЛУЧАЙНОГО ШУМА

Шейпак С. И.¹

(Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова, Москва)

Исследуется многокомпонентная система с фиксированным набором частиц в дискретном времени. В основе процесса синхронизации лежит взаимодействие частиц согласно некоторому семейству графов, вершины которых соответствуют частицам системы. В каждый момент времени система описывается вектором, компоненты которого меняются итеративно: состояние каждого агента линейно определяется через состояния его соседей в предыдущий момент времени и аддитивную случайную компоненту, а также связи между частицами меняются со временем. Таким образом, эволюция вектора состояния системы есть итеративное умножение на стохастические матрицы из некоторого класса и добавление случайного вектора. В статье изучается величина, характеризующая удалённость системы от положения консенсуса, и приводятся условия, накладываемые на семейство графов и достаточные для получения верхней оценки для этой величины. Кроме того, предлагается некоторая модифицированная модель, обеспечивающая верхнюю оценку при итерациях с графами, на которые наложены чуть более слабые условия.

Ключевые слова: многокомпонентные системы, граф коммуникаций, консенсус, синхронизация, случайный шум.

¹ Святослав Игоревич Шейпак, аспирант (s.sheypak@gmail.com).

1. Введение

В данной работе изучается модель многокомпонентной системы, эволюция которой происходит в дискретные моменты времени. Состояние каждой частицы (часто в нашей работе мы вместо слова «компонента» будем использовать его синонимы: частица, агент, узел) представляет собой функцию, принимающую значение в \mathbb{R} . Взаимодействие частиц происходит согласно некоторой топологии, где под топологией мы понимаем неориентированный граф, вершины которого соответствуют частицам, а рёбра — парам частиц. Для каждого агента граф определяет круг других частиц, согласно состоянию которых агент обновляет своё состояние. При этом обмен данными между частицами происходит с погрешностями: сигнал от соседей приходит с некоторым случайным шумом, а также с течением времени меняются связи между частицами.

Поведение модели имитирует обмен данными между некоторыми датчиками, приборами или иными объектами. При этом в данной задаче полагается, что число соседей, которое каждая частица может иметь, прописано у каждого объекта на уровне технической характеристики и не меняется со временем. Таким образом, на графы, согласно которым происходит обмен, накладывается ограничение: степени вершин остаются прежними и являются неизменяемым параметром системы. Мотивацией этого требования может служить то, что легче или дешевле перенаправлять сигналы, чем менять характеристики частиц, как например в системе воздушного сообщения легче изменить направления рейсов, чем расширять и сужать вместительность аэродромов. Или же можно представить коммутацию устройств, у каждого из которых есть фиксированное число физических портов и изменяются лишь схемы подключений приборов друг к другу.

Подобные модели могут использоваться в задачах регулирования нагрузки на серверы: имеется множество серверов, на которые приходят запросы пользователей. Во избежание отказов серверы перенаправляют пришедшие к ним запросы на другие

серверы, стараясь не допустить перегрузки из-за чрезмерно большого числа поступивших запросов. Для этого серверы объединяют в кластеры, внутри которых происходит перераспределение нагрузки. Возникает задача: как управлять процессом формирования кластеров так, чтобы удерживать систему в состоянии, наиболее близком к равномерному распределению нагрузки по серверам системы.

Похожие задачи уже изучались ранее в многочисленных работах. Так в [7, 11, 13] рассматриваются модели с переменной топологией. В [13] исследуется модель с переменными весами в непрерывном времени, а в [7, 11] — в дискретном. В [14] частицы рассматриваются как точки на плоскости, и топология связей между агентами связана с расстоянием между ними. Работа [8] посвящена изучению модели в постоянной топологии, но с аддитивным шумом. В [3] изучается система переменной топологии в дискретном и непрерывном временах, а также синхронизация с лидером, но при этом динамика системы является детерминированной. Авторы [2] изучают асимптотическое поведение детерминированной системы синхронизации на ориентированных графах. В [1] рассматривается дифференциальная модель достижения консенсуса и приводится предельная характеристика агентов в терминах алгебраических свойств матрицы Лапласа. Что касается изучения стохастических моделей, в работах [9] и [10] описываются модели с топологией специального вида: связи между частицами изменяются с некоторой периодичностью, также добавляется случайный шум. В работе [4] тоже рассматривается задача со случайным шумом, время непрерывно. Изучается консенсус динамической системы с точки зрения управления.

В данной же работе изучается многокомпонентная система, в которой, во-первых, связи между частицами меняются с течением времени, а во-вторых, эволюция происходит с помехами в виде некоррелированного аддитивного шума. Исследуется величина, являющаяся показателем того, насколько система далека от положения синхронизации, и получена оценка на предельное поведение этой величины. Кроме этого, во второй части статьи пред-

лагается несколько модифицированная система обмена данными, применение которой позволяет получить оценку предельной рассинхронизации системы для произвольного семейства графов с постоянным набором степеней вершин.

2. Основные обозначения

Мы будем придерживаться следующих обозначений: состояние системы в каждый момент времени описывается вектором, компоненты которого являются значениями каждой из частиц:

$$x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T \in \mathbb{R}^n, \quad t \in \mathbb{N}_0.$$

Зафиксируем набор

$$(d_1, \dots, d_n) \in \mathbb{N}^n.$$

Определение 1. Скажем, что семейство графов $\mathcal{G} = \{G\}$ удовлетворяет условию (d_1, \dots, d_n) , если выполнено следующее:

1. У всех графов G семейства \mathcal{G} общее множество вершин: $V_G = \{1, \dots, n\}$.

2. При каждой вершине i каждый граф G имеет петлю $(i, i) \in E_G$.

3. Все графы семейства неориентированы.

4. Мощность множества соседей вершины i в графе G равна d_i для любого графа семейства

$$|N(i, G) = \{j : (i, j) \in E_G\}| = d_i \quad \forall G \in \mathcal{G}.$$

В каждый момент времени t для системы определён граф $G(t) \in \mathcal{G}$, удовлетворяющего условию (d_1, \dots, d_n) . Вектор $x(t)$ меняется по следующему правилу:

$$x_i(t+1) = \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N(i, G(t))}^n x_j(t) + w_i(t),$$

где $w(t) = (w_1(t), \dots, w_n(t))^T$ — случайный шум, обладающий следующими свойствами:

$$(1) \quad \begin{aligned} & \{w(t)\}_{t \in \mathbb{N}_0} - \text{н.о.р. случайные векторы,} \\ & Ew(t) = (0, \dots, 0)^T, \\ & Ew(t)w^T(t) = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_n). \end{aligned}$$

Подобную эволюцию системы можно записать в матричном виде. Для этого каждому графу мы ставим в соответствие матрицу

$$A(t) = (a_{ij}(t))_{n \times n} : a_{ij}(t) = \frac{I(j \in N(i, t))}{d_i}.$$

Матрицы $A(t)$ неслучайны, они однозначно восстанавливаются по последовательности графов $\{G(t)\}$. На самом деле это матрицы инцидентности неориентированных графов, каждая из строк которых разделена на степень соответствующей вершины. В терминах векторов эволюция системы есть итеративный процесс, описываемый уравнением

$$(2) \quad x(t+1) = A(t)x(t) + w(t).$$

Мы говорим, что система синхронизирована (находится в состоянии консенсуса) в момент времени t_0 , если, $x(t_0) = \bar{x}(t_0)\mathbf{1}$, где $\bar{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t)$, $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$. Заметим, что в случае отсутствия шума ($w(t) = 0 \forall t \geq 0$), если в какой-то момент времени t_0 система синхронизирована, то вектор $x(t)$ при $t \geq t_0$ больше не меняется и во все последующие моменты система остаётся синхронизированной ($x(t) \equiv x(t_0)$, $t \geq t_0$). Для таких моделей можно изучать вопрос о сходимости системы к синхронизированному состоянию или о предельном значении $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t)$. Геометрически синхронизация означает, что вектор $x(t)$ оказывается в одномерном подпространстве, натянутом на вектор $\mathbf{1}$. В нашей же задаче добавляемый на каждом шаге случайный шум выводит вектор $x(t)$ за пределы этого подпространства и объектом нашего изучения становится квадрат l_2 -расстояния между вектором $x(t)$ и линейной оболочкой вектора $\mathbf{1}$:

$$\Sigma(t) = E\|x(t) - \bar{x}(t)\mathbf{1}\|_2^2.$$

Можно заметить, что $\bar{x}(t) = \frac{\langle x(t), \mathbf{1} \rangle}{\langle \mathbf{1}, \mathbf{1} \rangle}$. Поэтому то, что вычитается из $x(t)$ в выражении выше, есть в точности ортогональная проекция на рассматриваемое подпространство.

Процесс $x(t)$, безусловно, является марковским, и можно было бы изучать вопрос предельного распределения, но поскольку топология $G(t)$ постоянно меняется, нам хотелось хотя бы получить грубую оценку сверху на величину

$$\Sigma_{ss} = \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \Sigma(t).$$

В терминах данной модели можно описать задачу об управлении системой серверов. Вершины $\{1, \dots, n\}$ отвечают серверам. Каждому серверу в каждый момент приписывается вещественное число $f_i(t)$, характеризующее степень загруженности данного сервера. Аддитивный шум $w(t)$ выступает в роли поступивших запросов, которые меняют нагрузку на серверы системы. Ребра графа $G(t)$ отвечают разбиению множества серверов на кластеры: сервер пытается выровнять нагрузку со всеми серверами, с которыми он соединён рёбрами графа. Ситуация, когда система синхронизирована, в точности отвечает равномерной нагрузке на серверы системы. Можно изучать вопрос об управлении переменной топологией: какими свойствами должна обладать последовательность $\{G(t)\}$, чтобы система была способна выравнять нагрузку.

Задачи синхронизации многокомпонентных систем в различных постановках изучены целым рядом авторов. Например, в [7, 11] изучаются системы с переменными топологией и отсутствием шума. В этих работах авторами приводятся условия, налагаемые на последовательность графов и достаточные для синхронизации системы. В [8] топология постоянна, но присутствует случайный аддитивный шум, и в ней приводится некоторая оценка на величину Σ_{ss} . В [13] рассматривается модель в дискретном времени в топологии ориентированных графов с переменными весами. В данной работе авторы приводят необходимые и достаточные для синхронизации условия на веса рёбер графов. Работы

[16, 17] посвящены изучению синхронизации в присутствии случайного шума на ориентированных графах в непрерывном времени. Авторы демонстрируют получение оценок предельного поведения системы в результате решения некоторых матричных уравнений и из алгебраических свойств матриц системы. Алгебраические свойства ориентированных графов подробно изучены в работе [15] и других работах этого автора.

3. Основные результаты

В [8] был определён коэффициент эргодичности τ для матрицы A , соответствующей графу G из семейства, удовлетворяющего условию (d_1, \dots, d_n) :

$$\tau = \max_{\sum d_i y_i = 0} \frac{\|Ay\|_2}{\|y\|_2}.$$

Его можно рассматривать как функцию τ , сопоставляющую матрице вещественное число

$$\tau : A \rightarrow \max_{\sum d_i y_i = 0} \frac{\|Ay\|_2}{\|y\|_2}.$$

Определение 2. Рассмотрим последовательность графов $\{G(t)\}$ с элементами из семейства, удовлетворяющего условию (d_1, \dots, d_n) . Каждому графу $G(t)$ поставим в соответствие матрицу $A(t)$, как мы делали это выше, и для последовательности матриц $\{A(t)\}$ введём последовательность $\{\tau_t\}$:

$$\tau : A(t) \rightarrow \max_{\sum d_i y_i = 0} \frac{\|A(t)y\|_2}{\|y\|_2} = \tau_t.$$

По аналогии с классическим определением, τ_t также будем называть коэффициентами эргодичности.

Коэффициент τ_t напоминает l_2 -норму матрицы $A(t)$, рассчитанную по ортогональному дополнению к вектору π , где

$$(3) \quad \pi = \frac{1}{\sum d_i} (d_1, \dots, d_n)^\top.$$

Поскольку семейство графов $G(t)$ устроено так, что степени вершин не меняются, для всех матриц $A(t)$ вектор π будет общим. Кроме того, он является для них левым собственным вектором.

Лемма 1. Для любого t

$$\pi^\top A(t) = \pi^\top.$$

Доказательство.

$$\begin{aligned} (\pi^\top A(t))_i &= \sum_j \pi_j \cdot a_{ji} = \sum_j \frac{d_j}{\sum_k d_k} \cdot a_{ij} \frac{d_i}{d_j} = \\ &= \sum_j \frac{d_i}{\sum_k d_k} \cdot a_{ij} = \pi_i \sum a_{ij} = \pi_i. \end{aligned}$$

Введём обозначения:

$$(4) \quad \begin{aligned} \nu_{max}^2 &= \max_i E w_i^2(t), \\ \tau_{max} &= \max_t \tau_t. \end{aligned}$$

Поскольку число вершин остаётся неизменным, а графов с данной конфигурацией степеней вершин конечное число, в последнем равенстве используется максимум, а не супремум. Теперь может быть сформулирована основная теорема.

Теорема 1. Если $\tau_{max} < 1$, то

$$\Sigma_{ss} \leq \nu_{max}^2 \frac{2}{1 - \tau_{max}^2}.$$

Доказательство. Из геометрических соображений

$$\begin{aligned} \|x(t) - \bar{x}(t)\mathbf{1}\|_2^2 &= \|x(t) - \frac{\langle x(t), \mathbf{1} \rangle}{\langle \mathbf{1}, \mathbf{1} \rangle} \mathbf{1}\|_2^2 \leq \\ &\leq \|x(t) - \langle x(t), \pi \rangle \mathbf{1}\|_2^2. \end{aligned}$$

Поэтому имеет место неравенство:

$$\begin{aligned} \Sigma(t) &\leq \|x(t) - \langle x(t), \pi \rangle \mathbf{1}\|_2^2, \\ \Sigma_{ss} &\leq \limsup_{t \rightarrow \infty} \sup_{\{G(t)\}} \frac{1}{n} \|x(t) - \langle x(t), \pi \rangle \mathbf{1}\|_2^2. \end{aligned}$$

Рассмотрим

$$\begin{aligned}
 & x(t+1) - \pi^\top x(t+1)\mathbf{1} = \\
 & = A(t)x(t) + w(t) - \pi^\top (A(t)x(t) + w(t))\mathbf{1} = \\
 & = A(t)x(t) + w(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1} - \pi^\top w(t)\mathbf{1} = \\
 & = A(t)x(t) - \pi^\top x(t)A(t)\mathbf{1} + w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1} = \\
 & = A(t)x(t) - A(t)\pi^\top x(t)\mathbf{1} + w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1} = \\
 & = A(t)(x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}) + w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1}.
 \end{aligned}$$

Таким образом получаем равенство

$$\begin{aligned}
 & x(t+1) - \pi^\top x(t+1)\mathbf{1} = \\
 & = A(t)(x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}) + w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1}.
 \end{aligned}$$

Иследуем математическое ожидание l_2 -нормы выражения, стоящего в левой части:

$$\begin{aligned}
 & E\|x(t+1) - \pi^\top x(t+1)\mathbf{1}\|_2^2 = \\
 & = E\|A(t)(x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1})\|_2^2 + E\|w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1}\|_2^2.
 \end{aligned}$$

Здесь мы воспользовались тем, что слагаемые, в которые входит $Ew(t)$, равны нулю. Обратим внимание на то, что

$$\pi \perp (x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}).$$

Откуда следует, что

$$\begin{aligned}
 & \|A(t)(x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1})\|_2^2 \leq \tau_t^2 \|x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}\|_2^2 \leq \\
 & \leq \tau_{max}^2 \|x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}\|_2^2.
 \end{aligned}$$

Оценим слагаемое $E\|w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1}\|_2^2$.

$$\begin{aligned} E\|w(t) - \pi^\top w(t)\mathbf{1}\|_2^2 &= E \sum_{j=1}^n \left(w_j(t) - \sum_{i=1}^n \pi_i w_i(t) \right)^2 = \\ &= \sum_{j=1}^n E \left[(w_j(t))^2 - 2w_j(t) \left(\sum_{i=1}^n \pi_i w_i(t) \right) + \left(\sum_{i=1}^n \pi_i w_i(t) \right)^2 \right] = \\ &= \sum_{j=1}^n \left[\nu_j^2 - 2\pi_j \nu_j^2 + \sum_{i=1}^n \pi_i^2 \nu_i^2 \right] = \sum_{j=1}^n \nu_j^2 - 2\pi_j \nu_j^2 + n\pi_j^2 \nu_j^2 \leq \\ &\leq \nu_{max}^2 \sum_{j=1}^n 1 - 2\pi_j + n\pi_j^2 = \nu_{max}^2 (n - 2 + n\|\pi\|_2^2) \leq 2n\nu_{max}^2. \end{aligned}$$

Таким образом, для любого t имеет место неравенство

$$\begin{aligned} E\|x(t+1) - \pi^\top x(t+1)\mathbf{1}\|_2^2 &\leq \\ &\leq \tau_{max}^2 E\|x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}\|_2^2 + 2n\nu_{max}^2. \end{aligned}$$

Применяя предположение, что $\tau_{max} < 1$, имеем оценку

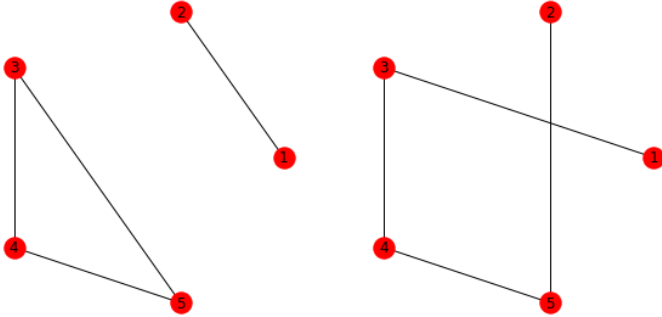
$$\begin{aligned} \limsup_{t \rightarrow \infty} E\|x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}\|_2^2 &\leq \frac{2n\nu_{max}^2}{1 - \tau_{max}^2} \\ \Sigma_{ss} &= \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E\|x(t) - \bar{x}(t)\mathbf{1}\|_2^2 \leq \\ &\leq \limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{n} E\|x(t) - \pi^\top x(t)\mathbf{1}\|_2^2 \leq \frac{2\nu_{max}^2}{1 - \tau_{max}^2}. \end{aligned}$$

4. Условия, достаточные для получения оценки

Мы видим, что если неравенство $\tau(A) < 1$ выполнено для всех матриц A графов G семейства, удовлетворяющего свойству (d_1, \dots, d_n) , то удовлетворены условия приведённой выше теоремы и имеет место требуемое неравенство. Но несмотря на то,

что графы одного семейства разделяют некоторые общие свойства, спектры их матриц могут быть устроены по-разному и, как следствие, будут разные τ .

В качестве примера рассмотрим два графа H и G на пяти вершинах из семейства со свойством $(1, 1, 2, 2, 2)$:



В первую очередь заметим, что правый (граф G) связан, а левый (граф H) нет. Если в итерационном процессе (2) в качестве матриц $A(t)$ будет участвовать матрица, соответствующая графу H , то синхронизации не произойдёт, поскольку частицы будут общаться только с частицами из своей компоненты связности. Алгебраически это тоже можно подтвердить. Для этого нам понадобится следующая лемма.

Лемма 2. Пусть $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ — собственные значения матрицы $A^\top(t)A(t)$, тогда

$$\lambda_1 \geq \tau_t^2 \geq \lambda_2.$$

Доказательство. Согласно теореме Куранта–Фишера ([6], теорема 4.2.6) для них выполнены соотношения

$$\lambda_k = \min_{S: \dim S = n-k+1} \max_{x \in S} \frac{\langle x, A^\top(t)A(t)x \rangle}{\langle x, x \rangle}.$$

Тогда можно записать

$$\begin{aligned} \max_x \frac{\langle x, A^\top(t)A(t)x \rangle}{\langle x, x \rangle} &= \min_{S: \dim S=n} \max_{x \in S} \frac{\langle x, A^\top(t)A(t)x \rangle}{\langle x, x \rangle} \geq \\ &\geq \max_{x \perp \pi} \frac{\langle x, A^\top(t)A(t)x \rangle}{\langle x, x \rangle} \geq \min_w \max_{x \perp w} \frac{\langle x, A^\top(t)A(t)x \rangle}{\langle x, x \rangle}. \end{aligned}$$

В терминах собственных значений

$$\|A(t)\|_2^2 = \lambda_1 \geq \tau^2 \geq \lambda_2.$$

Лемма доказана.

Введённым выше графам соответствуют матрицы:

$$A_H = \begin{pmatrix} 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{pmatrix},$$

$$A_G = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 1/2 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3 \end{pmatrix}.$$

Обе матрицы стохастичны, но A_H не является эргодической: у неё единица — двукратное собственное значение. Кроме того, $A_H^\top = A_H$. Поэтому, согласно последней лемме

$$1 \leq (\tau(A_H))^2 \leq 1,$$

откуда и получаем равенство $\tau(A_H) = 1$. При этом A_G эргодична и $\tau(A_G) \sim 0,7$. На основании этого примера можно заключить, что связность графа G является необходимым условием для неравенства $\tau(A_G) < 1$. Следует заметить, что она не является достаточным: в [8] приведены примеры связных графов, у которых

τ больше 1. Нам же нужно постараться уменьшить τ . В [16] в рамках похожей задачи рассматриваются приёмы по перестроению графа с целью уменьшения некоторых алгебраических показателей, влияющих на синхронизацию. Но поскольку нам важно сохранение свойства (d_1, \dots, d_n) , графы перестраивать мы не будем. Для нашей задачи было бы важным некоторым образом сузить семейство \mathcal{G} так, чтобы для всех графов из этого сужения выполнялось условие $\tau(A_G) < 1$. Помимо отыскания таких дополнительных условий для получения нужной оценки можно изучить модифицированную систему.

5. Модификация модели синхронизации многокомпонентной системы

Рассмотрим последовательность графов $\{G(t)\}$ из семейства, удовлетворяющего условию (d_1, \dots, d_n) . Каждому из них соответствует матрица $A(t)$. У этих матриц есть общий левый собственный вектор π , соответствующий собственному значению 1. Определим матрицу $F_\pi = \mathbf{1}\pi^\top$ и введём семейство матриц

$$B_\varkappa(t) = \varkappa A(t) + (1 - \varkappa)F_\pi.$$

Пусть многокомпонентная система изменяется по закону:

$$(5) \quad \begin{cases} x(t+1) = B_\varkappa(t)x(t) + w(t), \\ x(0) = x_0, \end{cases}$$

где $w(t)$ — случайный шум, определённый в (1).

Взглянем чуть подробнее на матрицу $B_\varkappa(t)$, являющуюся смесью двух стохастических матриц. Её участие в итеративном процессе можно интерпретировать следующим образом: матрица F_π отвечает за обмен сигналами по некоторому полному графу, рёбрам которого приписаны некоторые веса. Действительно,

$$x(t+1) = F_\pi x(t) \Leftrightarrow x_i(t+1) = \frac{\sum_j d(j)x_j(t)}{\sum_j d(j)}.$$

То есть каждая частица транслирует всем остальным свой сигнал с интенсивностью, пропорциональной собственной степени.

Можно сказать, что в системе присутствует супервизор, который, регулируя параметр \varkappa , сообщает, насколько каждой частице придерживаться обмену по топологии $A(t)$, а насколько синхронизироваться сразу со всеми агентами системы.

Из Леммы 2 видно, как величина $\tau(A(t))$ соотносится со спектром матрицы $A(t)$. Изучим, как связаны собственные значения матриц $A(t)$ и $B_\varkappa(t)$. Рассмотрим собственные значения матрицы $A(t)$:

$$\begin{aligned}\pi^\top A(t) &= \pi^\top, \\ e_j^\top A(t) &= \lambda_j e_j^\top \quad (|\lambda_j| < 1).\end{aligned}$$

По теореме Перрона–Фробениуса([5], §2, теорема 2), поскольку матрица $A(t)$ стохастична, 1 – наибольшее по модулю собственное значение. Если же матрица $A(t)$ неприводима (что равносильно связности графа $G(t)$), то это собственное значение имеет кратность 1.

Изучим собственные вектора у матрицы B_\varkappa .

$$\begin{aligned}\pi^\top B_\varkappa(t) &= \varkappa \pi^\top + (1 - \varkappa) \pi^\top \mathbf{1} \pi^\top = \pi^\top, \\ e_j^\top B_\varkappa(t) &= \varkappa \lambda_j e_j^\top + (1 - \varkappa) e_j^\top \mathbf{1} \pi^\top.\end{aligned}$$

Покажем, что $e_j^\top \mathbf{1} = 0$.

$$e_j^\top \mathbf{1} = e_j^\top A(t) \mathbf{1} = \lambda_j e_j^\top \mathbf{1} \Rightarrow (1 - \lambda_j) e_j^\top \mathbf{1} = 0.$$

Поскольку $\lambda_j \neq 1$, $e_j^\top \mathbf{1} = 0$. Отсюда следует, что

$$e_j^\top B_\varkappa(t) = \varkappa \lambda_j e_j^\top.$$

Таким образом, при преобразовании $A(t) \rightarrow B_\varkappa(t)$ все собственные значения, кроме максимального, умножаются на \varkappa . Изучим, что произошло с величиной τ^2 для матрицы B_\varkappa .

Лемма 3.

$$\tau_{\varkappa,t} = \max_{x \perp \pi} \frac{\|B_\varkappa(t)x\|_2}{\|x\|_2} = \varkappa \max_{x \perp \pi} \frac{\|A(t)x\|_2}{\|x\|_2} = \varkappa \tau_t.$$

Доказательство. Возьмём такой вектор y , что

$$\begin{aligned} y^\top \pi &= 0, \\ y^\top y &= 1. \end{aligned}$$

Запишем

$$\begin{aligned} y^\top B_\varkappa^\top(t) B_\varkappa(t) y &= \varkappa^2 y^\top A^\top A y + \varkappa(1 - \varkappa) y^\top A^\top \mathbf{1} \pi^\top y + \\ &+ \varkappa(1 - \varkappa) y^\top \pi \mathbf{1}^\top A y + (1 - \varkappa)^2 y^\top \pi \mathbf{1}^\top \pi^\top y. \end{aligned}$$

В последних трёх слагаемых присутствуют множители $y^\top \pi$ или $\pi^\top y$, которые равны нулю. Поэтому

$$\begin{aligned} y^\top B_\varkappa(t)^\top B_\varkappa(t) y &= \varkappa^2 y^\top A^\top(t) A(t) y \\ \tau_\varkappa &= \max_{x \perp \pi} \frac{\|B_\varkappa(t)x\|_2}{\|x\|_2} = \varkappa \max_{x \perp \pi} \frac{\|A(t)x\|_2}{\|x\|_2} = \varkappa \tau. \end{aligned}$$

Доказательство леммы завершено.

Теперь можно сформулировать утверждение об оценке предельного отклонения системы (5) от положения консенсуса.

Теорема 2. *Найдётся $\varkappa \in (0, 1]$ такое, что*

$$\Sigma_{ss} \leq \nu_{max}^2 \frac{2}{1 - \varkappa^2 \tau_{max}^2},$$

где ν_{max} и τ_{max} определены в (4).

Доказательство. Согласно определению,

$$\tau_{max} = \max_t \tau_t = \max_t \max_{x \perp \pi} \frac{\|A(t)x\|_2}{\|x\|_2}.$$

Тогда, применив предыдущую лемму, получим, что

$$\max_t \max_{x \perp \pi} \frac{\|B_\varkappa(t)x\|_2}{\|x\|_2} = \varkappa \tau_{max}.$$

Очевидно, что можно подобрать значение \varkappa таким, что $\varkappa \tau_{max} < 1$. В таком случае мы получим семейство графов $\{B_\varkappa(t)\}$, у которых общий левый собственный вектор π и для которых коэффициенты эргодичности $\tau(B_\varkappa(t)) = \varkappa \tau_t < 1$ при всех t . Тогда

для описанной системы выполнена теорема 1, из которой следует неравенство

$$\Sigma_{ss} \leq \nu_{max}^2 \frac{2}{1 - \kappa^2 \tau_{max}^2},$$

которое и является требуемой оценкой. Теорема доказана.

6. Заключение

В данной статье рассматривались случайные многокомпонентные системы со специальным взаимодействием. Взаимодействие между компонентами системы основано на коммуникационных графах из некоторого класса и, кроме того, динамика компонент подвержена воздействию аддитивного случайного шума. Были изучены алгебраические свойства графов важные для согласования компонент и приведены достаточные условия, налагаемые на семейство графов коммуникаций, при которых система в пределе находится в некоторой ограниченной окрестности положения консенсуса.

Также был приведён способ несколько ослабить эти условия — введение некоторой модификации системы, в которой присутствует дополнительная связь между частицами, имитирующая влияние супервизора и позволяющая взаимодействовать агентам, не являющимся непосредственными соседями. В такой системе важно лишь соблюсти условие на графы коммуникаций: степени вершин не должны меняться с течением времени.

Литература

1. АГАЕВ Р.П. *Об области сходимости дифференциальной модели достижения консенсуса* // Управление большими системами. – 2012. – №36. – С. 81–92.
2. АГАЕВ Р.П., ЧЕБОТАРЕВ П.Ю. *Об асимптотике в моделях консенсуса* // Управление большими системами. – 2013. – №43. – С. 55–77.
3. АГАЕВ Р.П., ЧЕБОТАРЕВ П.Ю. *Сходимость и устойчивость в задачах согласования характеристик (обзор базовых результатов)* // Управление большими системами. – 2010. – №30.1. – С. 470–505.
4. AMELINA N.O., FRADKOV A.L. *Approximate consensus in the dynamic stochastic network with incomplete information and measurement delays* // Automation and Remote Control. – 2012. – №73.11 – P. 1765–1783.
5. GANTMACHER F. *The Theory of Matrices*. – AMS Chelsea Publishing, 1959. – 276 p.
6. HORN R.A., JOHNSON C.R. *Matrix Analysis*. – Cambridge University Press New York, NY, USA, 2013. – 643 p.
7. JADBABAIE A., LIN J., MORSE A.S. *Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules* // IEEE Trans. and Automatic Control. – 2003. – №48.6 – P. 988–1001.
8. JADBABAIE A., OLSHEVSKY A. *Combinatorial bounds and scaling laws for noise amplification in networks* // European Control Conference – 2013 (ECC-2013). – July 17-19, 2013, Zürich, Switzerland. – P. 596–601.
9. MANITA A., MANITA L. *Distributed Time Synchronization Algorithms and Opinion Dynamics* // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – №955.1 – P. 012–038.

10. MANITA A., MANITA L. *Stochastic Time Synchronization Models Based on Agreement Algorithms* // Analytical and Computational Methods in Probability Theory. – 2017. – P. 361–375.
11. MOREAU L. *Stability of multiagent systems with time-dependent communication links* // IEEE Trans. on Automatic Control. – 2005. – №50.2 – P. 169–182.
12. OLFATI-SABER R., FAX J.A., MURRAY R.M. *Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems* // Proc. of the IEEE. – 2007. – №95.1 – P. 215–223.
13. SHI G., JOHANSSON K.H. *The Role of Persistent Graphs in the Agreement Seeking of Social Networks* // IEEE Journal on selected areas in communications/supplement. – 2013. – №31.9. – P. 595–606.
14. VICSEK T., CZIROK A., BEN-JACOB E., COHEN I., SHOCHET O. *Novel type of phase transition in a system of self-driven particles* // Physical Review Letters. – 1995. – №75.6 – P. 1226–1229.
15. WU C.W. *Algebraic connectivity of directed graphs* // Linear & Multilinear Algebra. – 2005. – №53.3 – P. 203–223.
16. YOUNG G.F., SCARDOVI L., LEONARD N.E. *Rearranging trees for robust consensus* // 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC). – Orlando, FL, USA, December 12-15, 2011. – P. 1000–1005.
17. YOUNG G.F., SCARDOVI L., LEONARD N.E. *Robustness of Noisy Consensus Dynamics with Directed Communication* // American Control Conference. – Marriott Waterfront, Baltimore, MD, USA – June 30-July 02, 2010. – P. 6312–6317.

CONSENSUS OF MULTICOMPONENT SYSTEM IN CHANGING TOPOLOGY WITH ADDITIVE NOISE

Sviatoslav Sheipak, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Ph.D. student (s.sheypak@gmail.com).

Abstract: The article focuses on multiagent systems with a fixed number of components. Particles synchronise in discrete moments of time according to a certain set of communication graphs. At every moment of time state of the system is described by a vector that updates iteratively. Each agent's state is determined by states of its neighbours and is influenced by additive noise component. Besides, links between particles change through time. Thus, the evolution of the system can be described as an iterative process where the state vector is multiplied by a certain stochastic matrix and added to a random vector. The aim of this paper is to analyze a value that represents a measure of how close to consensus the system is. The work suggests some restrictions on graphs that are sufficient to obtain an upper bound on that value. Besides, another modified model is presented. It allows relax conditions on graphs and still keep the value bounded.

Keywords: multiagent systems, communication graphs, consensus, synchronisation, random noise.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

Поступила в редакцию 17.05.2018.

Дата опубликования 31.07.2018.

УДК 004.94:614.841
ББК 32.813

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Цвиркун А. Д.^{1а}, Резчиков А. Ф.^{2аб}
Самарцев А. А.^{3б}, Иващенко В. А.^{4б},
Кушников В. А.^{5б}, Богомолов А. С.^{6б},
Филимонюк Л. Ю.^{7б}

^аФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,

^бИнститут проблем точной механики и управления РАН,
Саратов)

Предлагается математическая модель динамики развития пожара в помещениях. Существенным отличием модели является снижение сложности вычислений и повышение точности результатов за счет использования принципов клеточных автоматов. Разработанный программный комплекс с поддержкой параллельных процессов позволяет изменять геометрию помещений и отображать динамику состояния среды при пожаре, что необходимо для планирования действий

¹ Анатолий Данилович Цвиркун, главный научный сотрудник (tsvirkun@ipu.ru).

² Александр Федорович Резчиков, член-корреспондент РАН, научный руководитель ИПТМУ РАН, главный научный сотрудник ИПУ РАН (iptmuran@san.ru).

³ Андрей Алексеевич Самарцев, аспирант (samaand@ya.ru).

⁴ Владимир Андреевич Иващенко, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

⁵ Вадим Алексеевич Кушников, доктор технических наук, директор ИПТМУ РАН (iptmuran@san.ru).

⁶ Алексей Сергеевич Богомолов, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (alexbogomolov@ya.ru).

⁷ Леонид Юрьевич Филимонюк, кандидат технических наук, научный сотрудник (iptmuran@san.ru).

по ликвидации пожаров и эвакуации людей. Использование предложенной модели и программного комплекса совместно с известными моделями эвакуации позволит улучшить планировку помещений и уменьшить время эвакуации при пожарах.

Ключевые слова: математическая модель, модель, динамика развития пожара, помещение, эвакуация.

1. Введение

Проблема обеспечения безопасности людей при пожарах приобретает все большую актуальность. В последние годы число пожаров по России выросло до 240-300 тысяч в год. Пожары часто приводят к травмам и жертвам среди людей [14]. В связи с этим большое значение приобретает прогнозирование опасных факторов пожара и принятие упреждающих решений по устранению пожароопасных ситуаций [3, 4, 9-12].

Однако пожароопасные ситуации удается устранить далеко не всегда. Поэтому придается большое значение моделированию динамики развития пожара в помещениях, которое позволяет повысить уровень подготовки персонала противопожарных служб в области принятия эффективных решений по пожарной безопасности [1].

Для моделирования динамики развития пожара в помещениях в настоящее время широко применяются термогазодинамические модели, к которым относятся интегральные, зонные и полевые модели [6]. Интегральные и зонные модели, представляющие собой описание динамики развития пожара в виде систем дифференциальных уравнений, не столь критичны с точки зрения сложности вычислений, но в них имеет место существенное усреднение значений параметров по значительным пространствам, иногда по целым комнатам. Это неизбежно сказывается на получаемых с их помощью результатах.

Полевые модели носят более универсальный характер ввиду использования меньшего количества допущений при

построении, позволяют получить несколько лучшие по точности результаты, но требуют для своей реализации значительных вычислительных ресурсов.

В итоге термогазодинамические модели имеют множество допущений и большей частью оказываются весьма приближенными. Эти модели также несостоятельны и с точки зрения скорости вычислений. Поэтому использовать их для исследования динамики развития пожара в помещениях нецелесообразно.

В связи с этим приобретает актуальность задача создания новых моделей, которые будут, с одной стороны, достаточно простыми с точки зрения реализации и сложности вычислений, а с другой стороны, будут воспроизводить реалистичную картину процесса развития пожара. Эти модели должны быть также просты с точки зрения восприятия исследователем. Ведь зачастую при представлении данных моделей с помощью громоздких систем дифференциальных уравнений исследователь вынужден абстрагироваться от физического смысла из-за их сложности, что связано с риском совершения грубой ошибки при разработке модели как на этапе ее построения, так и на этапе реализации на ЭВМ.

К таким моделям следует отнести модель, представленную, например, в статьях [5, 16]. В этой и ряде других статей описаны модели развития пожара на основе клеточных автоматов. Однако авторами этих статей не учтены возможности:

- изменения геометрии помещений в режиме интерактивного взаимодействия пользователя с ЭВМ;
- отображения динамики изменения состояния среды в помещениях, в которых будет распространяться пожар.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность, научную новизну и практическую значимость данного исследования.

2. Постановка задачи

Необходимо построить гибкую к изменению параметров модель процессов распространения огня, тепла и задымленности при пожаре, которая позволит воспроизводить реальную динамику этих процессов.

3. Модель распространения огня

Пусть площадь помещения, заданная в декартовой системе координат xOy , разбита сетью S на квадратные элементы (клетки) со стороной dl , например, равной $dl = 0,05$ м. Тогда $S = \{c_{ij} \mid 0 \leq i < n, 0 \leq j < m\}$ – сеть, разделяющая помещение на клетки; n, m – количество клеток по горизонтали и вертикали соответственно; c_{ij} – клетка с координатами (i, j) .

Будем считать, что в определенный момент времени t каждая клетка находится в одном из следующих состояний.

1. Внутри клетки невозможно горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из негорючего материала. Такие клетки не меняют своего состояния в ходе моделирования. Если внутри клетки c_{ij} невозможно горение, то будем это обозначать как $c_{ij} \in NC$.

2. Внутри клетки возможно горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего материала. В такой клетке в ходе моделирования может иметь место возгорание. Если внутри клетки c_{ij} не наблюдалось горение к моменту времени t , то будем это представлять в форме $c_{ij} \in I_t$.

3. Внутри клетки имеет место горение. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего материала, который в данный момент горит. Горящий материал должен через некоторое время потухнуть, т.е. перейти в состояние «Материал внутри клетки выгорел». Если клетка c_{ij} горит в момент времени t , то будем это обозначать выражением $c_{ij} \in B_t$.

4. Материал внутри клетки выгорел. Это означает, что клетке соответствует участок стены или пола из горючего

материала, который в какой-то момент времени в прошлом горел, но сейчас не горит и в будущем гореть не будет – все горючие вещества израсходованы. Такие клетки больше не меняют свои характеристики в ходе моделирования. Нахождение клетки c_{ij} в данном состоянии в момент времени t будем записывать в виде $c_{ij} \in F_t$.

При этом для любого момента времени t семейство множеств $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$ является разбиением множества S , т.е. любые два множества из семейства попарно не пересекаются, а объединение всех множеств семейства равно множеству S . Иначе говоря, в каждый момент времени t клетка находится в одном и только одном состоянии из семейства $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$.

Отметим также, что имеют место соотношения:

$$I_0 \supseteq I_1 \supseteq \dots \supseteq I_t \supseteq I_{t+1} \supseteq \dots;$$

$$F_0 \subseteq F_1 \subseteq \dots \subseteq F_t \subseteq F_{t+1} \subseteq \dots .$$

Пусть имеется некоторое множество B_0 клеток, внутри которых в момент модельного времени $t = 0$ возникло горение. Все остальные клетки принадлежат либо множеству NC , либо множеству I_0 , в зависимости от того, из горючего или негорючего материала сделан участок пола к нему относящийся. Отметим, что $F_0 = \emptyset$. Множества $\{I_{t+1}, B_{t+1}, F_{t+1}\}$ определяются на каждом шаге модельного времени, исходя из множеств $\{NC, I_t, B_t, F_t\}$, по приведенному ниже алгоритму.

Распространение пожара в том или ином направлении в момент времени $t + 1$ определяется вероятностью P_{ij}^t возгорания внутри клетки, находящейся в состоянии I_t , с учетом ее характеристик и наличия соседних клеток, в которых наблюдается горение.

Вероятность возгорания внутри клетки определяется по соотношению, приведенному в [8]:

$$P_{ij}^t = v_{ij} \cdot f_{ij}^t dt / 4dl ,$$

где v_{ij} – линейная скорость распространения огня для клетки c_{ij} ; скорость, определяемая материалом участка пола, которому соответствует клетка; f_{ij}^t – параметр, характеризующий горение

соседних клеток в момент времени t ; dt – шаг модельного времени.

Параметр f_{ij}^t рассчитывается по выражению

$$f_{ij}^t = 2n_{ij+}^t + n_{ijx}^t,$$

где n_{ij+}^t – количество клеток, в которых имеет место горение в момент времени t , расположенных ортогонально, $n_{ij+}^t = \left| \left\{ c_{i-1,j}, c_{i,j-1}, c_{i,j+1}, c_{i+1,j} \right\} \cap B_t \right|$, а n_{ijx}^t – диагонально, $n_{ijx}^t = \left| \left\{ c_{i-1,j-1}, c_{i-1,j+1}, c_{i+1,j-1}, c_{i+1,j+1} \right\} \cap B_t \right|$, по отношению к клетке c_{ij} .

Параметр f_{ij}^t может принимать значение на отрезке $[0, 12]$, так как у каждой не крайней клетки имеется 4 ортогональных и 4 диагональных клетки-соседа. Если все эти клетки горят, то параметр f_{ij}^t принимает значение 12, если все они не горят, т.е. принадлежат множеству $\complement B_t$, то параметр f_{ij}^t равен 0. Доля горящих клеток, расположенных ортогонально по отношению к рассматриваемой клетке, принимается в два раза большим, чем диагонально расположенных клеток, так как расстояние между центрами диагонально расположенных клеток-соседей больше, чем расстояние между центрами ортогонально расположенных клеток-соседей. Для крайних клеток параметр f_{ij}^t может принимать значение на отрезке $[0, 8]$, а для угловых – на отрезке $[0, 5]$.

Клетка переходит из состояния B_t «Внутри клетки наблюдается горение» в состояние F_{t+1} «Материал внутри клетки выгорел», если внутри клетки заканчивается вся горючая масса. Пусть для каждой клетки c_{ij} задана горючая нагрузка m_{ij} в кг, ψ_{ij} – скорость выгорания горючей нагрузки в кг/с.

С момента возгорания в клетке масса горючего вещества m_{ij} меняется внутри нее по закону

$$(1) \quad m_{ij}^{t+1} = m_{ij}^t - \psi_{ij} dt,$$

где m_{ij}^t – масса горючей нагрузки клетки c_{ij} в момент времени t .

Таким образом, с момента возгорания до прекращения горения в клетке c_{ij} проходит время, определяемое выражением m_{ij} / ψ_{ij} . Формально вероятность H_{ij}^t перехода клетки из

состояния B_t в состояние F_{t+1} определяется выражением $H_{ij}^t = 1$, если $m_{ij}^t \leq 0$, и $H_{ij}^t = 0$ в противном случае.

Для каждой клетки c_{ij} выделены три варианта ее эволюции:

1. Неизменная принадлежность состоянию NC .
2. Принадлежность состоянию I_t на всем протяжении моделирования.
3. Последовательное прохождение через состояния I_t , B_t и F_t .

На рис. 1 показана динамика распространения огня в помещении из трех комнат. Черным цветом выделены клетки из множества NC , которые представляют собой стены, сделанные из негорючего материала. Темно-серым цветом выделены клетки, принадлежащие множеству F_{t_0} , светло-серым – множеству B_{t_0} , а белым – множеству I_{t_0} . Источник огня изначально находился в центре самой левой комнаты – комнаты 1.

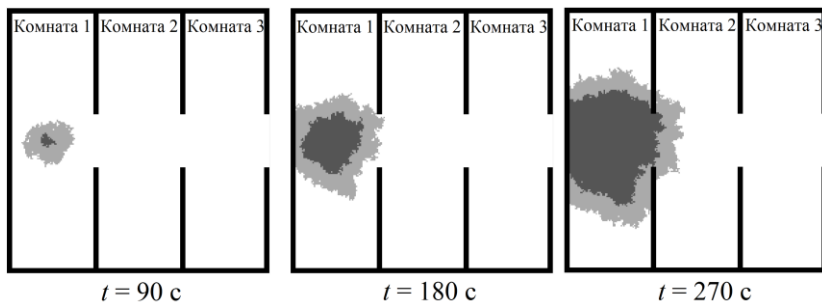


Рис. 1. Динамика распространения огня в помещении из трех комнат

Пожар перестает распространяться в тот момент времени t , когда множество $B_t = \emptyset$. Действительно, если $B_t = \emptyset$, то $(\forall i \in [0, n)) (\forall j \in [0, m)) (n_{ij+}^t = 0 \ \& \ n_{ijx}^t = 0)$, следовательно $(\forall i \in [0, n)) (\forall j \in [0, m)) (P_{ij}^{t+1} = 0)$, а поэтому $B_{t+1} = \emptyset$. По индукции $(\forall n > 0) B_{t+n} = \emptyset$.

Таким образом, все клетки, материал внутри которых не выгорел на момент времени t , так и останутся негоревшими,

т.е. $(\forall n > 0) I_{t+n} = I_t$. Так как множество клеток, материал внутри которых выгорел, может пополниться только за счет клеток, находящихся в этом состоянии, то $(\forall n > 0) F_{t+n} = F_t$. В итоге разбиение множества S перестает эволюционировать во времени и процесс распространения огня завершается [15].

4. Модель распространение тепла

Пусть θ_{ij} – значение, на которое может повыситься температура воздуха и перекрытий внутри клетки при условии ее полной тепловой изоляции при сгорании 1 кг горючего вещества внутри клетки

$$\theta_{ij} = \lambda_{ij}/C_{ij},$$

где λ_{ij} – удельная теплота сгорания горючей нагрузки внутри клетки c_{ij} ; C_{ij} – теплоемкость клетки c_{ij} , представляющая собой сумму теплоемкостей воздуха и перекрытий, соответствующих данной клетке.

Если внутри клетки наблюдается горение, то воздух над ней нагревается по закону [7]

$$T_{ij}^{t+1} = T_{ij}^t + \psi_{ij}\theta_{ij}dt,$$

где T_{ij}^t – температура внутри клетки c_{ij} в момент времени t ; dt – шаг модельного времени.

Однако температура внутри клетки может изменять величину не только за счет сгорания в ее пределах вещества, но и за счет распространения тепла.

Пусть k_{ij} – коэффициент, задающий теплопроводящие характеристики клетки c_{ij} , который зависит от материала и от высоты потолков. Клетка c_{ij} может обмениваться теплом с множеством других, связанных с ней клеток. Пусть также S_{ij} – множество клеток, связанных с клеткой c_{ij} , T_s^t – температура внутри одной из клеток множества S_{ij} на шаге модельного времени t , а k_s – коэффициент, задающий теплопроводящие характеристики внутри клетки s из множества S_{ij} .

Тогда температура внутри клетки c_{ij} на каждом следующем шаге модельного времени определяется соотношением

$$(2) \quad T_{ij}^{t+1} = T_{ij}^t + \frac{k_{ij}}{C_{ij}} \sum_{s \in S_{ij}} k_s (T_s^t - T_{ij}^t).$$

Вообще говоря, определить множество связанных клеток можно по-разному, корректируя, уточняя или приспособлявая модель к различным условиям ее использования. В используемой модели выбрана конфигурация, заданная графом $G = (V, E)$.

Пусть $W \subset C$ – множество клеток, которым соответствует стена, и для каждой клетки c_{ij} существует вершина графа $G = (V, E)$ $v_{ij} \in V$, а $e_{ijkl} \in E$ – ребро графа между вершинами v_{ij} и v_{kl} .

Тогда множество ребер E задается следующим образом:

$$\begin{aligned} E = \{ & e_{ijkl} \mid [((i = k) \& (|j - l| \in \{5; 25\})) \vee ((j = l) \& \\ & \& (|i - k| \in \{5; 25\}))] \& [\forall a, b (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& \\ & \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)] \rightarrow c_{ab} \notin W) \vee [((i = k) \& \\ & \& (|j - l| = 1)) \vee ((j = l) \& (|i - k| = 1))]\}. \end{aligned}$$

Если в графе G присутствует ребро e_{ijkl} , то клетки c_{ij} и c_{kl} будем считать связанными. Каждая клетка имеет от 4 до 12 связанных с ней клеток. Пользователь модели может корректировать скорость распространения огня и тепла путем модификации алгоритма выбора множества ребер для графа G , изменением значений параметров ψ_{ij} , θ_{ij} , v , C_{ij} и k_{ij} или начальных условий T_{ij}^0 . Возможно также добавление в модель третьего измерения, в этом случае граф G будет иметь ребра, содержащие клетки из различных слоев.

Температуру в крайних и угловых клетках можно считать равной температуре окружающей среды $T_{\text{окр}}$ на каждом шаге модельного времени. За счет таких клеток происходит теплообмен с окружающей средой.

Введение ребер, соединяющих далеко отстоящие клетки, позволяет ускорить процесс вычислений, увеличить шаг модельного времени и учесть различные способы распространения тепла.

Известно, что воздух обладает низкой теплопроводностью, поэтому основными механизмами передачи тепла при пожаре являются конвекция и излучение. Можно считать, что клетки, обменивающиеся теплом с помощью «длинных» ребер графа G , делают это с помощью конвекции и излучения.

5. Модель распространения дыма

Данная модель аналогична модели распространения тепла. Масса горючей нагрузки внутри каждой горящей клетки изменяется по закону (1). При горении образуется дым, количество которого зависит от дымообразующей способности вещества. Оптическая плотность дыма μ_{ij} в клетке c_{ij} , которая принадлежит множеству B_t «Внутри клетки наблюдается горение» растет каждый шаг модельного времени по закону

$$\mu_{ij}^{t+1} = \mu_{ij}^t + D_m \psi_{ij} dt / (h^2 z),$$

где D_m – дымообразующая способность вещества.

Дым начинает распространяться по помещению и попадать в соседние клетки. Для описания этого процесса можно прибегнуть к тому же приему, что и при моделировании распространения тепла.

Зададим граф G' , который будет отличаться от графа G лишь множеством ребер. Множество его ребер задается следующим образом:

$$\begin{aligned} E' = \{ e_{ijkl} \mid [((i = k) \& (|j - l| \in \{15; 50\})) \vee ((j = l) \& \\ \& (|i - k| \in \{15; 50\}))) \& [\forall a, b (a \in [\min(i, k); \max(i, k)] \& \\ \& b \in [\min(j, l); \max(j, l)] \rightarrow c_{ab} \notin W) \vee [((i = k) \& \\ \& (|j - l| = 1)) \vee ((j = l) \& (|i - k| = 1))] \} \}. \end{aligned}$$

Так как дым распространяется быстрее тепла, то для графа G' выбраны более длинные ребра, которые обеспечивают связь между более дальними клетками. Аналогичным образом определяется множество S_{ij}' клеток, связанных с клеткой c_{ij} . С учетом этого распространение дыма каждый шаг модельного времени задается аналогичным (2) соотношением:

$$\mu_{ij}^{t+1} = \mu_{ij}^t + k_{ij}^t \sum_{s \in S_{ij}^t} k_s^t (\mu_s^t - \mu_{ij}^t),$$

где k' – коэффициент, регулирующий скорость распространения дыма: k_{ij}' – для клетки c_{ij} , k_s' – для одной из клеток из множества S_{ij}' ; μ_s^t – оптическая плотность дыма для клетки из множества S_{ij}' .

Дальность видимости l_{ij}^t в клетке c_{ij} в момент времени t можно вычислить по соотношению $l_{ij}^t = 2,38/\mu_{ij}^t$ [2].

6. Программная реализация предложенной модели

Для реализации модели на языке *Java* разработан оригинальный программно-информационный комплекс *FireSim* с применением библиотеки графического интерфейса *Swing*. Комплекс использует три потока выполнения, что позволяет эффективно, без задержек, управлять процессом моделирования и отображением модели в окне программы, используя графический интерфейс (*GUI*) и интерфейс командной строки (*CLI*). Блок-схема программы, организующей распределение задач между потоками и порядок их выполнения, приведена на рис. 2.

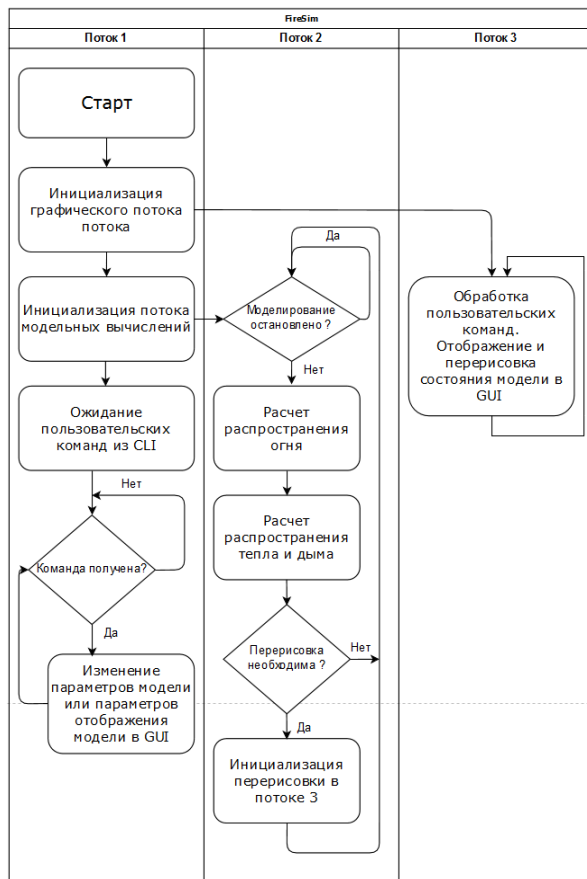


Рис. 2. Блок-схема работы программы

На рис. 2 обозначено: *GUI* – Graphical User Interface – графический пользовательский интерфейс; *CLI* – Command Line Interface – интерфейс командной строки. Используя *GUI* и *CLI*, пользователь может изменять режим работы программы в реальном времени, например, останавливать и возобновлять моделирование, добавлять источники огня, наблюдать состояния полей распространении огня, температур и задымленности, а также изменять вид их отображений.

7. Анализ результатов моделирования

С помощью разработанной модели исследована динамика развития пожара в помещении, план которого представлен на рис. 1. Размеры помещения – 10×10 м. Стены заданы координатами левого нижнего угла (x, y) , а также шириной по осям Ox и Oy ($xWidth$ и $yWidth$) в формате $(x; y; xWidth; yWidth)$ следующим образом: $\{(0,0; 0,0; 10; 0,2); (0,0; 0,2; 0,2; 9,6); (0,0; 9,8; 10; 0,2); (9,8; 0,2; 0,2; 3,8); (9,8; 6,0; 0,2; 3,8); (3,3; 0,2; 0,2; 3,8); (3,3; 6,0; 0,2; 3,8); (6,6; 0,2; 0,2; 3,8); (6,6; 6,0; 0,2; 3,8)\}$.

Стены при моделировании считались негорючим, а пол между стенами – горючим. Таким образом, все клетки, соответствующие пространству внутри стен принадлежат множеству NC . Множество B_0 задано совокупностью 5 клеток: клеткой с координатами $(1,25; 5)$ в середине комнаты 1, а также четырьмя ее ортогональными соседями. Все остальные клетки в момент времени $t_0 = 0$ принадлежат множеству I_0 . Шаг модельного времени $dt = 0,04$ с.

При моделировании использовались следующие значения параметров модели:

$$(\forall i \in [0, n]) (\forall j \in [0, m]) (\theta_{ij} = 36000 \text{ К}, m_{ij} = 0,1 \text{ кг},$$

$$\psi_{ij} = 0,0015 \text{ кг/с}, T_{ij}^0 = 293 \text{ К}, v_{ij} = 0,005 \text{ м/с}, k_{ij} = 0,2,$$

$$D_m = 23 \text{ м}^2/\text{кг}, c_{ij} \notin NC \rightarrow C_{ij} = 1,0, c_{ij} \in NC \rightarrow C_{ij} = 4,0).$$

На рис. 3 приведено отображение распределения температуры в помещении в момент времени $t = 270$ с в окне программы *FireSim*.

Температура отображается согласно шкале, изображенной на этом рисунке справа, в диапазоне от $T_{min} = 20^\circ\text{C}$ (белый цвет, который используется также и для более низких температур) до $T_{max} = 500^\circ\text{C}$ (черный цвет, который используется также и для более высоких температур). Черным цветом также показаны стены. При желании пользователь может изменять T_{min} и T_{max} с помощью команд консольного интерфейса. Из рисунка видно, что скорость распространения тепла сквозь стены значительно меньше, чем по открытому пространству. У выхода можно

заметить некоторое искажение поля температур в виде светлых полос, которые расположены на расстоянии 5 и 25 клеток от выхода и связаны со способом выбора графа G .

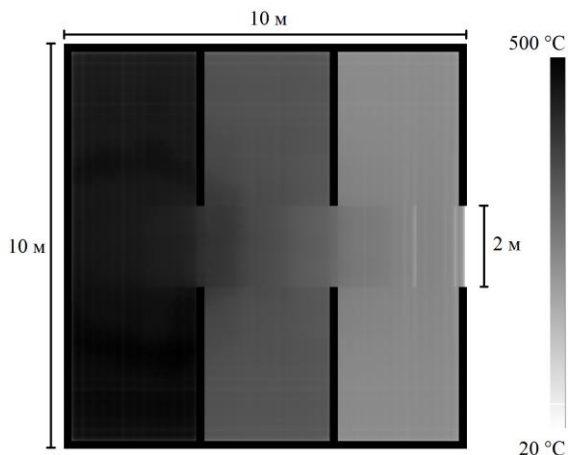


Рис. 3. Распределение температуры в помещении
в момент времени $t = 270$ с

На рис. 4 и 5 представлены графики динамики изменения средней температуры и средней оптической плотности дыма в каждой из комнат.

Рис. 4 позволяет также сравнить динамику изменений средней температуры, рассчитанной по предложенной модели, с данными, полученными с помощью модели, представленной в [13]. Как видно из графиков, представленных на рис. 5, полученные по данным моделям результаты соотносятся с приемлемой точностью. Из рис. 4 также следует, что температура достигает максимума сначала в самой левой комнате – комнате 1, потом в средней комнате – комнате 2 и, наконец, в правой комнате – комнате 3. Это логично, так как источник пожара изначально находился в самой левой комнате. В то же время из графиков видно, что максимальная средняя температура за все время пожара во второй комнате выше, чем в первой и третьей комнатах. Это объясняется тем, что к началу

распространения пожара во второй комнате воздух был уже разогрет воздушными потоками из первой комнаты, а также тем, что эта комната не имеет выходов и не является угловой. Теплообмен с окружающей средой в этом случае минимален. В то же время комната 3 остывает быстрее всех, потому что там располагается выход из помещения – открытая дверь. Это обеспечивает наибольшую теплоотдачу из этой комнаты. Интересно, что комната 1, несмотря на более далекое расположение от выхода, остывает чуть быстрее комнаты 2. Это связано с тем, что комната 1 является угловой, что обеспечивает большую отдачу тепла, а также с тем, что пожар в комнате 1 заканчивается раньше.

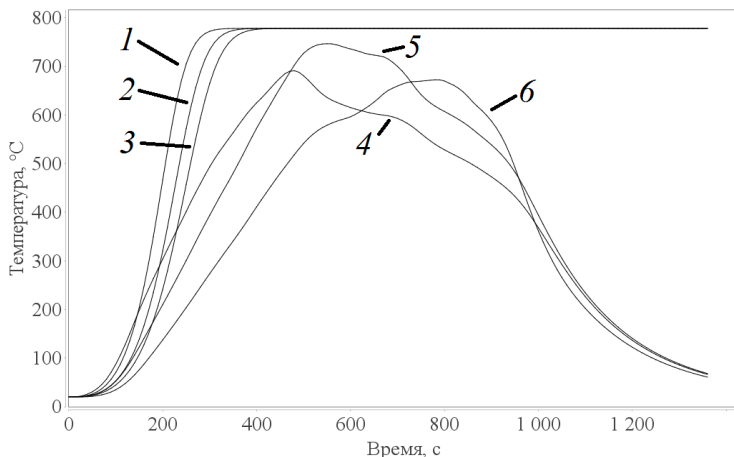


Рис. 4. Динамика изменения средней температуры в помещениях: 1, 2, 3 – средние температуры в первой, второй и третьей комнатах соответственно, рассчитанные по модели, представленной в [13]; 4, 5, 6 – средние температуры в первой, второй и третьей комнатах соответственно, рассчитанные с помощью FireSim

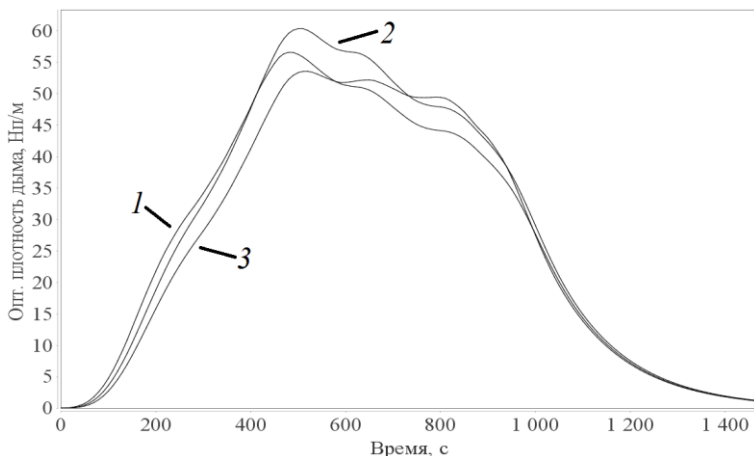


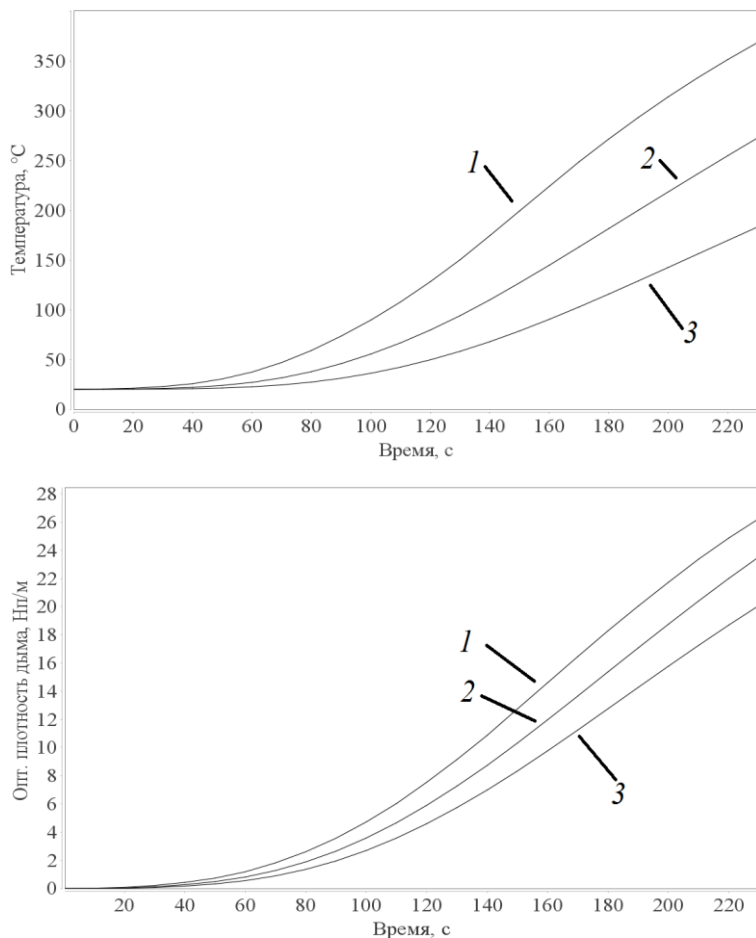
Рис. 5. Динамика изменения средней оптической плотности дыма: 1 – в комнате 1; 2 – в комнате 2; 3 – в комнате 3

Наибольший интерес для исследования представляет начальная стадия пожара, так как именно в это время должна происходить эвакуация из помещения. При дальнейшем развитии пожара температура и загрязненность воздуха продуктами горения достигает критически опасных значений, и проведение эвакуации становится невозможным из-за практически мгновенной гибели эвакуируемых в таких условиях.

На рис. 6 представлен в крупном масштабе начальный участок графика, приведенного на рис. 4 и 5, характеризующего начальную стадию пожара для значений времени от 0 до 220 с.

Из графиков на рис. 6 видно, что температура в комнатах довольно быстро достигает весьма высоких значений. Так, в первой второй и третьей комнатах температура достигает 100°C за время около 105 с, 135 с и 170 с, соответственно, а оптическая плотность дыма значения 4Нп/м за 95с, 105с и 115с, соответственно. При такой задымленности дальность видимости составляет около половины метра, при такой дальности видимости выбраться из помещения очень сложно даже при хорошем знакомстве с его планом.

При реализации предложенной модели на процессоре Intel Core i5 3470 с 8 Гб RAM за секунду реального времени можно осуществить моделирование процесса развития пожара для двухсекундного интервала времени.



*Рис. 6. Динамика изменения средней температуры и средней оптической плотности дыма вначале пожара:
1 – в комнате 1; 2 – в комнате 2; 3 – в комнате 3*

8. Заключение

Предложена математическая модель динамики развития пожара в помещениях, позволяющая повысить точность и скорость моделирования. Точность моделирования во многом определяется размерами клеток, на которые разбито помещение, и шагом модельного времени при умеренном расходе вычислительных ресурсов на реализацию модели. Разработан программный комплекс с графическим и консольным интерфейсами, который позволяет пользователю осуществлять визуализацию помещений, изменять их размеры и конфигурацию.

Предложенная модель открывает возможности эффективного совместного моделирования развития пожаров и эвакуации людей из помещений. Это позволит по результатам вычислительных экспериментов выдавать рекомендации по изменению геометрических параметров помещений для более оперативной эвакуации людей в случае пожара.

Модель может быть использована в составе тренажерных комплексов для обучения и переподготовки персонала МЧС.

Литература

1. АМБАРЦУМЯН А.А., БРАНИШТОВ С.А. *Событийные модели управления технологическими процессами ориентированные на защиту от ошибочных действий персонала.* – М.: Гринвич, 2006. – 168 с.
2. *Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности. Приложение к приказу МЧС России от 30.06.2009 № 382.*
3. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. *Критические ситуации в человеко-машинных системах.* – Саратов: Изд-во «ООО Наука», 2015.

4. РЕЗЧИКОВ А.Ф., ТВЕРДОХЛЕБОВ В.А., ИВАЩЕНКО В.А. и др. *Человек. Машина. Среда.* – Саратов: Изд-во «ООО Наука», 2013.
5. РУДНИЦКИЙ В.Н., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ПУСТО-ВИТ М.А. *Распараллеливание и оптимизация выполнения расчетов процесса развития пожара на основе трехмерных клеточных автоматов // Вектор науки ТГУ.* – 2014. – №1. – С. 22–26.
6. СВИРИН И.С. *Обзор моделей распространения пожара в зданиях // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.* – 2013. – №6. – С. 114–129.
7. СИВУХИН Д.В. *Общий курс физики.* – Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Физматлит, 2005. – 544 с
8. *Техническое руководство СИТИС: ВИМ 4.10.* // Строительные информационные технологии и системы ООО «Ситис», 2017. – 23 с.
9. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф. *Подход к построению нечёткой базы знаний для определения пожароопасных ситуаций // Сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-27). Секции 6, 7, 8 / Под общ. ред. А.А. Большакова.* – Тамбов: ТГТУ, 2014. – Т. 3. – С. 125–127.
10. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Алгоритм поддержки принятия решений по устранению пожароопасных ситуаций на промышленных предприятиях // Управление большими системами.* – 2014. – Вып. 52. – С. 148–163.
11. ТУПИКОВ Д.В., РЕЗЧИКОВ А.Ф., ИВАЩЕНКО В.А. *Подход к прогнозированию значений факторов пожароопасных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление.* – 2014. – №7. – С. 48–51.

12. ТУПИКОВ Д.В., ИВАЩЕНКО В.А. *Разработка базы знаний для оперативного управления взрыво- и пожароопасным производством* // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – №3(72). – С. 133–137.
13. ФЕДОСОВ С.В., ИБРАГИМОВ А.М., СОЛОВЬЕВ Р.А. и др. *Математическая модель развития пожара в системе помещений* // Вестник МГСУ. – 2013. – №4. – С. 121–128.
14. ХОЛЩЕВНИКОВ В.В., САМОШИН Д.А., ПАРФЕНЕНКО А.П. *Эвакуация и поведение людей при пожарах: учеб. пособ.* – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 261 с.
15. ЦЫГАНОВ В.В., ЧЕБОТАРЕВ П.Ю. *Исследование эффективности графовых метрик при решении задач классификации на стохастических сетях* // Proc. of the 3rd International Conference on Computing for Physics and Technology (CPT2015). – М.: Институт физико-технической информатики, 2016. – С. 298–307.
16. APIECIONEK L., ZARZYCKI H., CZERNIAK J.M., DOBROSIELSKI W.T., EWALD D. *The cellular automata theory with fuzzy numbers in simulation of real fires in buildings* // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 559. – P. 169–182.

MATHEMATICAL MODEL OF FIRE DYNAMICS DEVELOPMENT IN PREMISES

Anatolii Tsvirkun, *Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, leading researcher (tsvirkun@ipu.ru).*

Alexander Rezhikov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, corresponding member of RAS, scientific supervisor (iptmuran@san.ru).*

Andrey Samartsev, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, post-graduate (samaand@yandex.ru).*

Vladimir Ivaschenko, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, leading researcher (iptmuran@san.ru).*

Vadim Kushnikov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Doctor of Science, director (iptmuran@san.ru).*

Aleksey Bogomolov, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, senior researcher (alexbogomolov@ya.ru).*

Leonid Filimonyuk, *Institute of Precision Mechanics and Control of RAS, Saratov, Candidate of Science, researcher (iptmuran@san.ru).*

Abstract. A mathematical model of the dynamics of fire in premises is proposed. A significant difference of the model is a reduction in the complexity of calculations and an increase in the accuracy of results due to the use of the principles of cellular automata. The developed software package with support for parallel processes allows you to change the geometry of rooms and display the dynamics of the environment in a fire, which is necessary for planning actions for the elimination of fires and the evacuation of people. Using the proposed model and software package together with known evacuation models will improve the layout of the premises and reduce the time of evacuation in fires.

Key words: mathematical model, model, dynamics of fire development, premises, evacuation.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко.

Поступила в редакцию 16.01.2018.

Опубликована 31.07.2018.

УДК 629.7.05

ББК 32.811.7

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ АДАПТИВНО-РОБАСТНЫЙ АЛГОРИТМ КОНТРОЛЯ ДАННЫХ В КОМПЛЕКСНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Грошев А. В.¹,

(ПАО «АНПП «Темп-Авиа», Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ), Арзамас)

Фролова О. А.²

(ПАО «АНПП «Темп-Авиа», Арзамас)

Эксплуатация приборов спутниковой навигации на высокодинамичных беспилотных летательных аппаратах с безызбыточными инерциально-спутниковыми навигационными системами (ИСНС) требует повышения помехозащищённости. Помехи в навигационных данных, вызываемые как средствами радиоэлектронного противодействия, так и сбоями в работе аппаратуры потребителей, могут быть выделены и парированы. В качестве индикатора сбойных данных может быть использована последовательность невязок фильтра Калмана, нормированная при помощи ее среднеквадратичного отклонения. По результатам проведенных исследований получен эффективный алгоритм идентификации и исключения из совместной обработки сбойной информации в ИСНС.

Ключевые слова: инерциально-спутниковая навигационная система, помехозащищенность, оптимальная фильтрация, контроль, диагностика

¹ Андрей Владленович Грошев, инженер-математик 2 кат., аспирант (groshev_andrew@mail.ru).

² Оксана Александровна Фролова, начальник сектора, к.т.н. (kseniya_frolova@mail.ru).

1. Введение

В современных условиях, на текущем уровне развития средств радиоэлектронного противодействия (РЭП) проблема помехозащищенности и информационной надежности безызбыточных инерциально-спутниковых систем на высокодинамичных беспилотных летательных аппаратах становится особенно острой. Она тесно связана с целостностью и достоверностью навигационных определений, которая отражает способность навигационного комплекса непрерывно поддерживать требуемые тактико-технические характеристики в изменяющихся условиях эксплуатации [7]. Традиционные подходы к обеспечению целостности ИСНС, опирающиеся на обнаружение отказавших модулей, исключение их из структуры ИСНС и реконфигурацию оборудования за счет аппаратурной избыточности, не могут быть применены в таких системах по причине их удорожания.

В связи с текущим развитием средств РЭП и их широким распространением возрастает вероятность параметрической неопределенности навигационных определений, поступающих в обработку со стороны аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (АП СНС). Повышение помехозащищенности ИСНС в условиях радиоэлектронного противодействия может быть обеспечено как за счет средств самого приемника спутниковых навигационных систем (СНС) (использование сигналов с кодом высокой точности (ВТ-кодом), использование некогерентных и универсальных когерентно-некогерентных алгоритмов, использование информации инерциальной навигационной системы (ИНС) в контурах систем слежения приемника СНС, пространственные методы), так и алгоритмически в составе ИСНС [1, 5].

2. Оптимальная фильтрация

В качестве средства для комплексной обработки информации бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и АП СНС хорошо себя зарекомендовали уравнения

оптимальной калмановской фильтрации, так как они весьма удобны с вычислительной точки зрения для реализации в составе реальной бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС). Однако в условиях статистической и параметрической неопределенности реализация интеграционных свойств на базе такого аппарата связана с рядом трудностей, обусловленных возможной потерей точности и целостности системы обработки информации. Для реализации выбранного метода контроля достоверности навигационных параметров выберем следующую структуру уравнений оптимальной фильтрации. Возьмем

$$(1) \quad x_{k+1} = F_{k+1,k}x_k + w_{k+1};$$

$$(2) \quad z_{k+1} = H_{k+1}x_{k+1} + v_{k+1},$$

где x_{k+1} – вектор состояния размерности n ; w_{k+1} – вектор возмущения размерности n ; z_{k+1} – вектор измерений размерности m ; v_{k+1} – вектор случайных ошибок измерения размерности m ; $F_{k+1,k}$ – матрица состояния системы размера $n \times n$; H_{k+1} – матрица измерений размера $m \times n$.

На основе известной оценки \hat{x}_k в текущий момент времени k дадим прогноз оценки для будущего момента $k + 1$ (априорная оценка $\hat{x}_{k+1/k}$), который в дальнейшем скорректируем с учетом текущих измерений z_{k+1} .

Таким образом, в начале такта вычисления $k + 1$ спрогнозируем оценки на этот такт по уравнению

$$(3) \quad \hat{x}_{k+1/k} = F_{k+1,k}\hat{x}_k.$$

Далее вычислим оптимальную матрицу усиления K_{k+1} , т.е. матрицу, при которой среднее значение суммы квадратов ошибок оценивания принимает наименьшее значение. При этом в первую очередь определим значение априорной матрицы ошибок оценивания $P_{k+1/k}$ по формуле

$$(4) \quad P_{k+1/k} = F_{k+1,k}P_kF_{k+1,k}^T + Q_k,$$

где Q_k – ковариационная матрица, действующего на объект возмущения, размера $n \times n$. Матрицу Q_k зададим исходя из свойств определенной системы, как $Q_k = M[w_k w_k^T]$, считая что составляющие вектора w некоррелированы между собой.

Оптимальную матрицу усиления вычислим по уравнению:

$$(5) \quad K_{k+1} = P_{k+1/k} H_{k+1/k}^T \left[H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T + R_{k+1} \right]^{-1}$$

где R_{k+1} – неотрицательно определенная матрица шумов измерений размером $m \times m$. Матрицу R_{k+1} зададим исходя из свойств определенной системы, как $R_{k+1} = [v_j v_k^T]$, считая что составляющие вектора v некоррелированы между собой.

На следующем такте вычислений будет необходимо значение апостериорной матрицы ошибок оценивания P_{k+1} . Поэтому после вычисления матрицы K_{k+1} определим

$$(6) \quad P_{k+1} = [I - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k+1/k}.$$

В конце такта $k + 1$ осуществляется корректирование априорной оценки с учетом текущих измерений:

$$(7) \quad \hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1/k}).$$

В следующем такте (такт $k + 2$) процедура вычислений повторяется вновь на основе найденных для такта $k + 1$ значений $\hat{x}_{k+1/k}$, P_{k+1} .

Роль начальных условий выполняют следующие априорные оценки:

$$(8) \quad \hat{x}(0) = M[x(0)]; \quad P_0 = M[x(0)x^T(0)].$$

Более подробно эти уравнения оптимальной фильтрации рассматриваются, например, в работе[3].

В качестве параметров вектора состояния системы будем использовать ошибки по координатам в проекциях на инерциальную систему координат, ошибки по проекциям вектора скорости в инерциальной системе, ошибки угловой ориентации БПЛА, нулевые сигналы акселерометров, дрейф нулевого сигнала датчиков угловой скорости (ДУС). Состав вектора состояния выбирается исходя из наиболее значимых составляющих ошибок инерциальной навигационной системы и возможностей бортовой цифровой вычислительной машины. Матрицу состояния $F_{k+1,k}$ (динамическую модель системы) опишем при помощи уравнений ошибок ИНС в инерциальной системе координат (ИСК), при условии редуцированности системы, в связи с ограниченными вычислительными возможностями БЦВС, как:

$$(9) \quad \Delta \dot{\vec{R}}_u = \Delta \vec{V}_u,$$

$$(10) \quad \Delta \dot{\vec{V}}_u = -\langle \vec{\psi} \rangle \vec{a}_u + A_{u1} \Delta \vec{a}_1,$$

$$(11) \quad \dot{\vec{\psi}} = -A_{u1} \Delta \vec{\omega}_1,$$

$$(12) \quad \Delta \dot{\vec{a}}_1 = 0,$$

$$(13) \quad \Delta \dot{\vec{\omega}}_1 = 0,$$

где $\Delta \dot{\vec{R}}_u$ – ошибка местоположения; $\Delta \dot{\vec{V}}_u$ – ошибка по проекциям вектора скорости; $\dot{\vec{\psi}}$ – ошибка ориентации; \vec{a}_1 – ускорение в связной системе координат(ССК), \vec{a}_u – ускорение в ИСК; A_{u1} – матрица ориентации ИСК относительно ССК; $\langle \vec{\psi} \rangle$ – вектор ошибок по углам ориентации; $\Delta \vec{a}_1$ – нулевые сигналы акселерометров; $\Delta \vec{\omega}_1$ – дрейф нулевого сигнала ДУС. Таким образом, вектор состояния будет выглядеть, как:

$$(14) \quad x = [\Delta R_{x_u} \Delta R_{y_u} \Delta R_{z_u} \Delta V_{x_u} \Delta V_{y_u} \Delta V_{z_u} \Delta \psi \Delta \theta \Delta \gamma \Delta \vec{a}_{1x} \Delta \vec{a}_{1y} \Delta \vec{a}_{1z} \Delta \vec{\omega}_{1x} \Delta \vec{\omega}_{1y} \Delta \vec{\omega}_{1z}],$$

где $\Delta \psi$, $\Delta \theta$, $\Delta \gamma$ – ошибки подвеса по углам курса, тангажа и крена.

Матрица $F_{k+1,k}$ на каждом шаге измерений будет иметь следующий вид:

$$(15)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_{u,z} & -a_{u,y} & A_{u1}[0][0] \cdot \Delta t & A_{u1}[0][1] \cdot \Delta t & A_{u1}[0][2] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -a_{u,z} & 0 & a_{u,x} & A_{u1}[1][0] \cdot \Delta t & A_{u1}[1][1] \cdot \Delta t & A_{u1}[1][2] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a_{u,y} & -a_{u,x} & 0 & A_{u1}[2][0] \cdot \Delta t & A_{u1}[2][1] \cdot \Delta t & A_{u1}[2][2] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[0][0] \cdot \Delta t & -A_{u1}[1][0] \cdot \Delta t & -A_{u1}[2][0] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[0][1] \cdot \Delta t & -A_{u1}[1][1] \cdot \Delta t & -A_{u1}[2][1] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[0][2] \cdot \Delta t & -A_{u1}[1][2] \cdot \Delta t & -A_{u1}[2][2] \cdot \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

В системе предполагается малое изменение нулевых сигналов акселерометров и дрейфа нулевого сигнала ДУС в запуске,

исходя из незначительности неортогональности осей и масштабных коэффициентов (предполагается, что они были скомпенсированы в процессе калибровки БИНС).

Коррекцию навигационного решения БИНС будем осуществлять по информации АП СНС. Наиболее информативными параметрами, выдаваемыми АП СНС, являются геодезические координаты и вектор скорости. Поэтому вектор измерений будет состоять из ошибок по координатам и ошибок по проекциям вектора скорости в инерциальной системе координат:

$$(16) Z = [\Delta R_{x_u} \Delta R_{y_u} \Delta R_{z_u} \Delta V_{x_u} \Delta V_{y_u} \Delta V_{z_u}].$$

3. Типы помех

В условиях радиоэлектронного противодействия по характеру воздействия на АП СНС преобладают два основных типа помех – маскирующие и имитирующие. Маскирующие помехи ухудшают характеристики приемного устройства, создают фон, на котором затрудняется или полностью исключается обнаружение, распознавание и выделение полезных сигналов. Имитирующие (дезинформирующие) помехи – это сигналы, излучаемые станцией помех для внесения ложной информации в подавляемые средства [6]. В результате АП СНС начинает выдавать недостоверные навигационные измерения при наличии признаков достоверности данных.

В качестве примера дезинформирующей помехи, широко распространенной в данный момент, можно привести spoofing-атаку на АП СНС – это атака, которая пытается обмануть приемник, широкопередатально передавая немного более мощный сигнал, чем полученный от спутников GPS или ГЛОНАСС, такой, чтобы быть похожим на ряд нормальных сигналов [8]. Эти имитирующие сигналы изменены таким способом, чтобы заставить получателя неверно определять своё местоположение, считая его таким, какое отправит атакующий.

Защититься от таких атак можно снятием признака достоверности информации АП СНС и работой в инерциальном режиме на время сбоя. Неустойчивая работа АП СНС при наличии признака достоверности данных приводит к выработке

алгоритмом комплексирования БИНС и АП неверной навигационной информации, что негативно отражается на управлении летательным аппаратом. Для предотвращения вышеописанной ситуации в настоящей работе предлагается алгоритм контроля достоверности измерений АП СНС на этапе комплексной обработки информации. В нашем случае рассматриваются высокодинамичные БПЛА с инерциальной системой управления (без резервирования, БИНС+АПСНС), когда критически важно раннее обнаружение уводящих сигналов, которые с высокой вероятностью приведут к нештатному завершению движения.

4. Контроль и адаптивно-робастная оценка состояния ИСНС

Почти любая дезинформирующая помеха, включая уводящий сигнал, может быть выделена на фоне обновляемой последовательности действительных ошибок оценивания (так называемых невязок фильтра Калмана (ФК)). Нарушение адекватности матмоделей ошибок и реальных измерительных процессов, а также наличие аномальных наблюдений приводит к расходимости и потере целостности ФК, что проявляется в значительном отличии действительных ошибок оценивания от нуля и от их прогнозируемых среднеквадратичных значений, получаемых в результате решения уравнения Рикатти относительно ковариационной матрицы ошибок оценивания. Таким образом, диагональные элементы матрицы P задаются априорно и могут значительно отличаться от апостериорных ошибок ковариации.

В соответствии с теорией калмановской фильтрации обновляемая последовательность невязок ФК $v_k = z_k - H_k \cdot F_{k,k+1} \cdot \hat{x}_{k-1}$, где $F_{k,k+1} \cdot \hat{x}_{k-1}$ – априорная оценка вектора ошибок x_k на k -м шаге по $k-1$ измерениям, должна представлять собой белый шум с нормальным распределением.

Процедуры локализации нарушений в навигационном комплексе опираются на технологию поканальной (поэлементной) обработки вектора наблюдений $z_i = \{z_1, \dots, z_m\}$, позволяющей

контролировать навигационный комплекс по обобщенным параметрам, характеризующим состояние каждого из m измерительных каналов [2]. Для контроля i -го измерительного канала предлагается использовать квадрат невязки ФК, нормированной при помощи среднеквадратичного отклонения ее скользящего невзвешенного среднего, рассчитанного на интервале времени, при помощи скользящего окна. Скользящее среднее было выбрано для нормирования, так как оно само по себе является фильтром низких частот, т.е. пропускает низкочастотную активность (долгосрочные циклы), отсекая высокочастотные – случайные колебания [4]. Таким образом, за индикатор примем квадрат скользящей средней, совмещенный с квадратом невязки процедурой нормирования.

На первоначальном этапе произведем накопление значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (СКО) ряда невязок до заполнения скользящего окна, использующегося для анализа системы. Для обеспечения адаптивности в системе было выбрано окно в 20 измерений ($D_{win} = 20$), на интервале времени 2 с (при частоте обновления данных АП СНС в 10 Гц). При большей длине окна снижается скорость сходимости значений нормированных невязок к нормальному уровню после обнаружения сбойной информации, кроме того увеличивается время запуска алгоритма.

На начальном этапе работы алгоритма ($D_{win} < 20$) проводятся следующие процедуры для каждого измерительного канала:

1. Расчет математического ожидания ряда невязок и простого кумулятивного скользящего среднего модулей невязок в каждом канале, где $i = 1, \dots, 6$ (3 канала по координатам и 3 канала по проекциям вектора скорости):

$$(17) \quad M_i = \sum_{j=1}^{takt} v_{i,j} / takt;$$

$$(18) \quad \bar{M}_i = \sum_{j=1}^{takt} |v_{i,j}| / takt,$$

где M_i – математическое ожидание невязки в i -м канале; \bar{M} – кумулятивное скользящее среднее модуля невязки в i -м

канале; $v_{i,j}$ – невязка в i -м канале на текущем такте; $takt$ – общее количество измерений; i – номер канала.

2. Расчет СКО ряда невязок и СКО кумулятивного невзвешенного скользящего среднего ряда модулей невязок в каждом канале:

$$(19) \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{takt} (M_i - v_{i,j})^2 / takt};$$

$$(20) \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{takt} (\bar{M}_i - |v_{i,j}|)^2 / takt},$$

где σ_i – СКО ряда невязок в i -м канале; $\bar{\sigma}_i$ – СКО скользящего среднего ряда модулей невязок в i -м канале.

СКО скользящего среднего модулей невязок $\bar{\sigma}$ рассчитывается на всем протяжении стационарного полета, т.е. является кумулятивным, и необходимо для определения нижней границы знаменателя нормированной невязки. При очень малой дисперсии невязок ФК и нестационарностях, возникающих при относительно больших ошибках БИНС и интенсивных угловых эволюциях, невязка, очевидно, бракуется, но при установлении нижней границы СКО этого удастся избежать, хотя при этом частично снижается чувствительность метода.

В штатном режиме функционирования алгоритма проводятся следующие процедуры для каждого измерительного канала:

1. Расчет квадрата нормированной невязки:

$$(21) \|v^2_{i,takt}\| = (v_{i,takt} / \sigma_i)^2.$$

В качестве нормы на этом этапе используем СКО ряда невязок из последних $D_{win} = 20$ элементов.

2. Коррекция математического ожидания при помощи скользящего окна:

$$(22) M_i = \left(\sum_{j=takt-20}^{takt} v_{i,j} \right) / D_{win}.$$

3. Коррекция кумулятивного скользящего среднего и его СКО на всей траектории движения при условии вхождения

нормированной невязки в допусковый интервал (используется для определения нижней границы знаменателя нормированной невязки):

$$(23) \bar{M}_i = \sum_{j=1}^{takt} |v_{i,j}| / takt,$$

$$(24) \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{takt} (\bar{M}_i - |v_{i,j}|)^2 / takt},$$

где $takt$ – это номер элемента от начала измерений.

4. Коррекция СКО ряда невязок при помощи скользящего окна:

$$(25) \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=takt-20}^{takt} (M_i - v_{i,j})^2 / D_{win}}.$$

5. Сравнение невязки с допусковым интервалом

Допусковый интервал для квадрата нормированной невязки выберем исходя из статистических свойств нормированной невязки, а именно: при отсутствии рассогласования между реальными z_k и прогнозируемыми $H_k \cdot F_{k,k-1} \cdot \hat{x}_{k-1}$ наблюдениями

квадрат нормированной невязки имеет распределение χ^2 с определенной вероятностью. При условии того, что нами была выбрана длина окна D_{win} , возьмем табличное значение критерия χ^2 для D_{win} степеней свободы с некоторой вероятностью φ : $\chi^2(\varphi, D_{win})$. Так как критерий χ^2 оценивает совокупность элементов ряда с единичной нормой $\left(\sum_{j=1}^{D_{win}} v_j^2 \right)$, то для приведения нор-

мы к единичной (т.е. нормирование каждой невязки по уровню 3σ вместо σ) для оценки одного элемента будем использовать величину $\alpha = \chi_{3\sigma}^2(\varphi, D_{win}) / D_{win}$.

Однако, вследствие особенностей измерителей комплексных систем, выбор вероятности φ целесообразно проводить апостериорно после оценки уровня нестационарностей, присутствующих конкретным измерителям.

Квадрат нормированной невязки формируется по текущей невязке и отражает текущее состояние i -го канала вектора на-

блюдений. Его отклонение от допуска ($\|v_{i, \text{fakt}}^2\| > \alpha$) может быть связано как с кратковременными сбоями, так и с долгосрочными уводами, либо отказами. При отсутствии нарушений невязка обрабатывается обобщенным фильтром Калмана, а парирование отказов или сбоев АП СНС происходит путем использования текущих оценок ФК в качестве пролонгированного решения.

Таким образом, данный способ позволяет локализовывать и парировать нарушения в измерениях АП СНС.

5. Дополнительные факторы, влияющие на сохранение тактико-технических характеристик информационной системы

Помимо сбоев и помех в навигационных определениях АП СНС, на поведение невязки могут влиять и такие параметры, как геометрический фактор АП СНС ($GDOP$), СКО навигационного решения АП СНС по горизонтальным координатам и в вертикальном канале ($HDOP$ и $VDOP$), а также количество НКА в зоне видимости АП СНС. При изменении любого из этих параметров, могут наблюдаться и, зачастую, наблюдаются, особенно, в высотном канале, скачки в навигационных определениях, поступающих в обработку со стороны АП СНС. В этом случае, при нахождении геометрического фактора АП СНС в допустимых точностных пределах ($GDOP < \beta$, где β – необходимая точность навигационных определений), предлагается использовать информацию, поступившую с АП СНС, в качестве скорректированных координат в комплексном решении.

Скачки в навигационных определениях всегда сопровождаются резким изменением дисперсии нормированной невязки. Таким образом, при резком изменении дисперсии индикатора ($D_v > \delta$, где D_v – дисперсия нормированной невязки, рассчитанная на интервале D_{win}), предлагается идентифицировать изменения в геометрическом факторе, и если они присутствуют, то присваивать вектору с скорректированными значениями координат и скоростей значения координат и скоростей, пришедших с АП СНС, а также обнулять оценки по ошибкам в координатах и

скоростях вектора состояния x_k , при этом сохраняя оценки ошибок по углам подвеса и эквивалентных ошибок по нулевым сигналам акселерометров и ДУС:

$$(26) \vec{R}_k = \vec{R}_{\text{АПСНС}},$$

$$(27) \vec{V}_k = \vec{V}_{\text{АПСНС}},$$

$$(28) x_k[0 \div 5] = 0,$$

где \vec{R}_k и \vec{V}_k – векторы с комплексным решением БИНС и АП СНС по координатам и проекциям скоростей в инерциальной системе; $\vec{R}_{\text{АПСНС}}$ и $\vec{V}_{\text{АПСНС}}$ – векторы с решением АП СНС по координатам и проекциям скоростей в инерциальной системе; $x_k[0 \div 5]$ – первые 6 элементов вектора состояния.

6. Обработка контроля достоверности измерений АП СНС на цифровом математическом и имитационном комплексах моделирования

Для проверки функциональности сбоезащиты проведем обработку различных типов сбойной информации на цифровом математическом комплексе. Подадим измерения высоты с математической модели АП СНС с различными типами сбоев:

- «залипание» сигнала;
- увод сигнала по высоте со скоростью 1 м/с;
- увод сигнала по высоте со скоростью 2 м/с.

Моделирование проведем в условиях задания различных ошибок БЧЭ, ошибок ориентации и различного уровня шума АП СНС. Для примера приведем результаты со следующим уровнем погрешностей: $СКО_{3\sigma} = 3$ м; $t_{nv} = 2$ с; $\Delta\dot{\omega}_1 = 10$ °/час; $\Delta\dot{a}_1 = 0,03$ м/с²; $\omega_k = 0,03\%$; $\Delta\psi = 60'$; $\Delta\theta = 20'$; $\Delta\gamma = 90'$; где t_{nv} – время начальной выставки; $\Delta\dot{\omega}_1$ – дрейф нулевого сигнала ДУС; $\Delta\dot{a}_1$ – нулевые сигналы акселерометров; ω_k – погрешности масштабных коэффициентов ДУС; $\Delta\psi$ – ошибка подвеса по углу курса; $\Delta\theta$ – ошибка подвеса по углу тангажа; $\Delta\gamma$ – ошибка подвеса по углу крена, $СКО_{3\sigma}$ – СКО шума координат АП СНС по

уровню 3σ . Выберем малое время начальной выставки, чтобы ошибки не успели скомпенсироваться и алгоритм ушел в автономный полет с недооцененными дрейфами нулевого сигнала ДУС и нулевыми сигналами акселерометров.

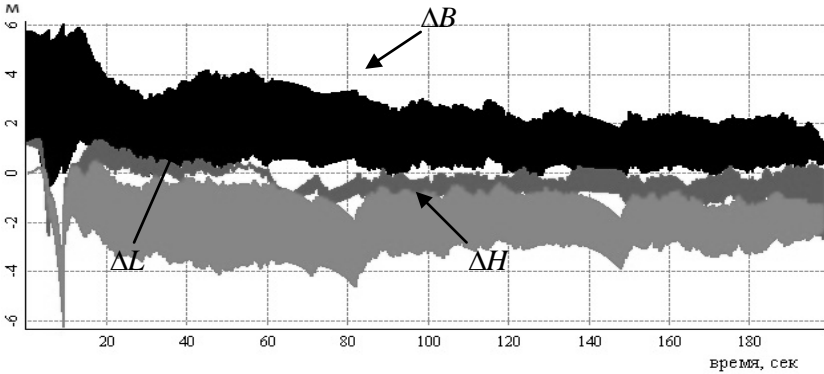


Рис. 1. Ошибки алгоритма комплексирования: по широте (ΔB), по долготе (ΔL), по высоте (ΔH)

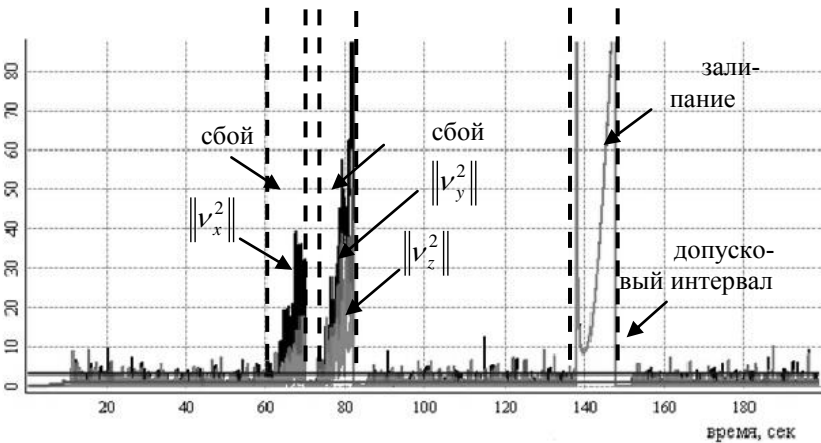


Рис. 2. Квадраты нормированных невязок: на ось X ($\|v_x^2\|$), на ось Y ($\|v_y^2\|$), на ось Z ($\|v_z^2\|$)

На рис. 1 и 5 под ошибками алгоритма комплексирования ΔB , ΔL , ΔH подразумеваются рассогласования между навигационными определениями алгоритма комплексирования БИНС с АП СНС и эталонной информацией моделирующего комплекса.

Из рис. 1–2 можно сделать вывод, что при заданных ошибках начальных условий, залипания сигналов и сбои величиной 1–2 м/с быстро идентифицируются при уровне шума, сопоставимом со скоростью увода, а в режиме пролонгации за время сбоя не происходит накопления ошибок.

Испытания алгоритма комплексирования с разработанным блоком контроля на математическом комплексе показали его работоспособность и функционирование в соответствии с заложенной логикой. Моделирование работы алгоритма в условиях выдачи АП СНС сбоев различного типа подтвердили его работоспособность и заявленные свойства надежности контроля.

Для проверки функциональности сбоезащиты в условиях приближенных к реальным проведем отработку алгоритма на комплексе имитационного моделирования, в состав которого входят реальные измерительные устройства: реальная АП СНС, имитатор спутниковых сигналов ИМ-2(ФБМИ.464928.003 РЭ), реальная система навигации и автоматического управления, включающая в себя БЦВС и блок из 3 гироскопов и 3 акселерометров (в качестве блока чувствительных элементов (БЧЭ) используется математическая модель).

Моделирование проведем в условиях задания ошибок БЧЭ и ошибок подвеса на уровне: $\omega_0 = 10^0/\text{час}$, $a_0 = 0,03 \text{ м/с}^2$, $\omega_k = 0,03\%$, $\Delta\psi = 60'$; $\Delta\theta = 20'$. Результаты работы алгоритма сбоезащиты в составе имитационного комплекса представлены на рис. 3–5.

По рис. 4 видно, что в показаниях АП СНС в каналах по широте и высоте присутствуют скачки по координатам. Алгоритм сбоезащиты надежно идентифицирует их и исключает из обработки, комплексируясь только на участках достоверной информации АП СНС.

Также следует отметить необходимость ограничения СКО невязки по нижней границе, которое необходимо для снижения уровня чувствительности контроля при работе с реальными

измерителями (ИМ-2+АП СНС), и может быть откорректировано при других уровнях нестационарностей на других измерителях. При высоком уровне шума сбой с малой скоростью увода не идентифицируются до тех пор пока смещение навигационных определений не превысит уровень шума.

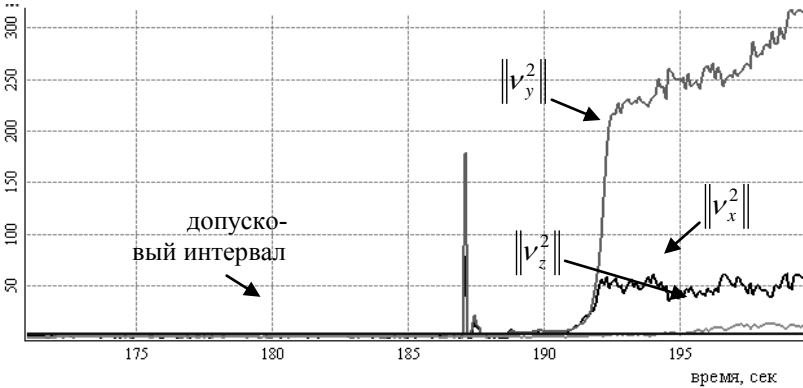


Рис. 3. Квадраты нормированных невязок: на ось X ($\|v_x^2\|$),
на ось Y ($\|v_y^2\|$)

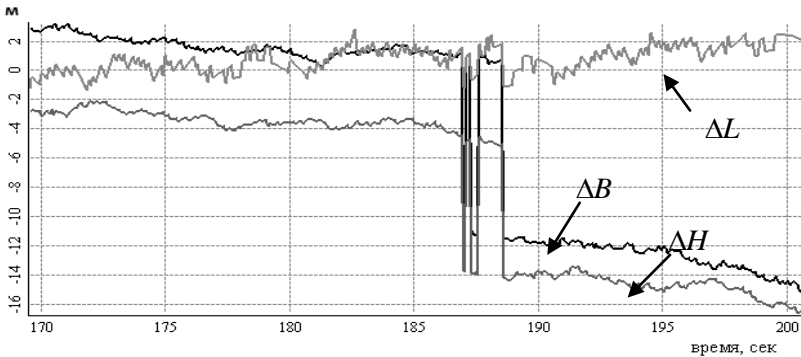


Рис. 4. Рассогласование по координатам АП СНС и модуля эталонных измерений: по широте (ΔB), по долоте (ΔL), по высоте (ΔH)

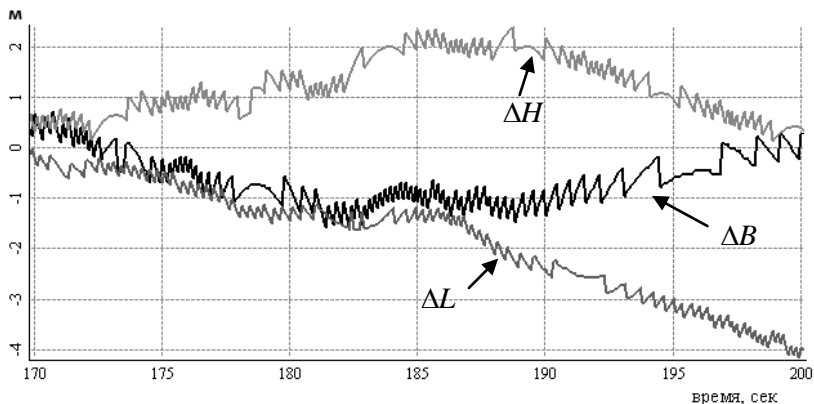


Рис. 5. Ошибки алгоритма комплексирования: по широте (ΔB), по долготе (ΔL), по высоте (ΔH)

Таким образом, по проведенным испытаниям с ИМ-2 и АП СНС на комплексе имитационного моделирования можно сделать вывод об обеспечении алгоритмом сбоезащиты заданных свойств надежности контроля и его функционировании в соответствии с заложенной логикой.

7. Заключение

Разработанный алгоритм сбоезащиты, построенный на принципах контроля нормированной невязки, позволяет своевременно локализовывать и парировать аномальные навигационные определения, за счет чего достигается повышение точности и информационной надежности бесплатформенной ИСНС.

Испытания алгоритма комплексирования с разработанным блоком контроля на цифровом математическом комплексе и комплексе имитационного моделирования показали его работоспособность и функционирование в соответствии с заложенной логикой как при математическом моделировании, так и при работе с реальными измерительными устройствами, и подтвердили его работоспособность и заявленные свойства надежности контроля.

Также следует отметить небольшой объем вычислительной загрузки, требуемой для функционирования алгоритма в составе

реального вычислителя, за счет малого количества итераций, необходимых для пересчета параметров алгоритма сбоезащиты на каждом такте его работы, что позволяет использовать его на вычислителях с низкой вычислительной мощностью.

Литература

1. ГРОШЕВ А.В., ФРОЛОВА О.А. *Алгоритм контроля достоверности измерений инерциально-спутниковой навигационной системы* // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"», 2016. – 691 с.
2. ДМИТРИЕВ С.П., КОЛЕСОВ Н.В., ОСИПОВ А.В. *Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем.* – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. – 208 с.
3. КУЗОВКОВ Н.Т., САЛЫЧЕВ О.С. *Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация.* – М.: «Машиностроение», 1982. – 216 с.
4. ЛОНЕР Р.Л., УИЛКИНСОН Г.Н. *Устойчивые статистические методы оценки данных.* – М.: Машиностроение, 1984. – 232 с.
5. МУХОРТОВ В.В., КОРОЛЕВ И.Д., ШКУРИНСКИЙ С.В. *Защита систем спутниковой навигации от внешних программно-аппаратных воздействий* // Инновации в науке: сб. ст. по матер. LV междунар. науч.-практ. конф. – №3(52), Часть II. – Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 102–108.
6. ОСИПОВ А.С. *Военно-техническая подготовка. Военно-технические основы построения средств и комплексов РЭП* / Учебник под науч. ред. Е.Н. Гарина. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 344 с.
7. ЧЕРНОДАРОВ А.В. *Контроль и адаптивно-робастная оценка состояния интегрированных навигационных систем на базе квантово-оптических измерителей* // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – №185(11). – С. 5–12.

8. PSIAKI M.L., HUMPHREYS T.E. *Protecting GPS From Spoofers Is Critical to the Future of Navigation* // IEEE Spectrum. Telecommunication. Security. – 29 July 2016. – URL: <https://spectrum.ieee.org/telecom/security/protecting-gps-from-spoofers-is-critical-to-the-future-of-navigation>.

**THE NOISE-IMMUNE ADAPTIVITY-ROBUST
ALGORITHM OF CONTROL THE MEASUREMENTS
RELIABILITY OF THE INERTIAL-SATELLITE
NAVIGATION SYSTEMS**

Andrey Groshev, JSC «ARPE «Temp-Avia», Arzamas, engineer-mathematician, post-graduate student(groshev_andrew@mail.ru).

Oksana Frolova, JSC «ARPE «Temp-Avia», Arzamas, sector superior, candidate of technical science.

Abstract: The application of the equipment of satellite navigation system as a part of highly dynamic unmanned aerial vehicles (UAVs) with breakeven inertial navigation satellite systems(INSS) demands to increase the noise immunity. The noise in navigation information caused both electronic countermeasure equipment and failure functioning of equipment of consumers of satellite navigation system may be separate and parry. As indicator of failure data may be used Kalman's filter sequence of residual, normalized by her mean square deviation. This indicator can insure both noise-immune and adaptivity-robust systems state value.

Keywords: inertial satellite navigation system, noise immunity, optimum filtering, control, diagnostics

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.М. Вишневым.

Поступила в редакцию 22.11.2017.

Опубликована 31.07.2018.

**МОДЕЛИ И СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ
РАЗРАБОТКОЙ И ВНЕДРЕНИЕМ
ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ И ТЕХНОЛОГИЙ
(НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА)¹**

**I. МЕХАНИЗМЫ ОТБОРА ПРИОРИТЕТНЫХ
ПРОЕКТОВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ**

Бурков В. Н.², Еналеев А. К.³,
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Строгонов В. И.,⁴
(ОАО НИИАС, Москва)

Федянин Д. Н.⁵
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

В первой из двух частей статьи предложены подходы к организации управления выполнением и внедрением разработок сложных проектов по созданию инновационных средств и технологий, обеспечивающих энергоэффективность железнодорожного транспорта. Рассмотрены методы оценки и клас-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ОАО «РЖД» в рамках научного проекта №17-20-05216.

² Владимир Николаевич Бурков, доктор технических наук, профессор (vlab17@bk.ru).

³ Анвер Касимович Еналеев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (anverena@mail.ru).

⁴ Владимир Иванович Строгонов, доктор технических наук (v.strogonov@vniias.ru).

⁵ Денис Николаевич Федянин, младший научный сотрудник (dfedyanin@inbox.ru).

сификации проектов по степени реализуемости и эффективности. Представлены модель и алгоритм планирования ресурсного обеспечения для комплекса проектов.

Ключевые слова: классификация, уровень зрелости разработок, энергоэффективность, распределение фондов, контроль, управление, организация.

1. Введение

Важнейшей задачей крупных производственных объединений, таких как, например, Холдинг РЖД (далее организация), является внедрение в свою хозяйственную деятельность инновационных средств и технологий с целью повышения энергоэффективности. Решение этой задачи требует значительных вложений финансовых, материальных, интеллектуальных и трудовых ресурсов. Вследствие ограниченности этих ресурсов и того, что имеющийся научно-технологический задел и ожидаемая эффективность рассматриваемых средств и технологий находятся на различных уровнях готовности (зрелости), возникают вопросы отбора приоритетных проектов и определения степени участия организации в продолжении разработок этих проектов, а также степени участия в доведении некоторых из них до уровня, при котором возможно опытное производство и последующее внедрение. Для этого предлагается разбить имеющиеся заделы по исследованиям и разработкам на классы, характеризующие уровень их разработки (степень зрелости и оцениваемой перспективности с точки зрения возможности внедрения в серийную эксплуатацию). Разбиение на классы (на 3 слоя проектов) предлагалось осуществлять при анализе взаимосвязи сложных проектов в [4]. В настоящей статье предлагается установить четыре класса разработок, а именно:

- класс проектов, находящихся на уровне фундаментальных НИР;
- класс проектов, находящихся на уровне ОКР;
- класс разработок, по которым созданы опытные образцы средств и технологий;

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

- идеи и разработки, перспективность которых еще недостаточно исследована или сомнительна.

Классификация на разряды по уровням разработок в мировой практике определяется стандартами TRL (Technology Readiness Level) [25, 27, 30]. В этих стандартах проекты по уровню разработок делятся на 9 разрядов. Мы видим следующее соответствие этих разрядов по рассматриваемым здесь четырем классам:

- класс идей и разработок, перспективность которых недостаточно исследована, соответствует разрядам TRL1 и TRL2;
- класс проектов, находящихся на уровне фундаментальных НИР, соответствуют TRL3 и TRL4;
- класс проектов, находящихся на уровне ОКР, соответствуют TRL5–TRL7;
- класс разработок, по которым созданы опытные образцы средств и технологий, соответствуют TRL8 и TRL9.

В статье описывается метод разбиения на классы проектов на основе анализа уровня завершенности и перспективности исследований и разработок по совокупности разнородных показателей с использованием и развитием методологии комплексного оценивания, основы которой были заложены еще в работах [2, 3]. Методика отнесения к различным классам в статье проиллюстрирована на примере проектов по разработке и внедрению инновационных энергоэффективных средств и технологий, включая использование альтернативных видов энергии для тяги поездов.

В зависимости от класса, к которому отнесена та или иная разработка, предлагаются различные варианты участия организации в ее поддержке и финансировании. Для решения этой задачи предлагается механизм распределения финансирования комплекса проектов.

Участие в поддержке и финансировании разработок из разных классов требует модернизации системы управления научно-техническим комплексом организации. С этих позиций исследованы возможности совершенствования структуры управления научно-технической сферы.

Обзор исследований по обозначенной тематике содержится в [20–22, 26, 28, 29].

2. Комплексная оценка проектов и их классификация

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Рассматриваемая система комплексного оценивания инновационных проектов включает следующие блоки мероприятий.

Первый блок мероприятий заключается в формировании по возможности полного списка проектов, имеющих отношение к рассматриваемой области средств и технологий.

Второй блок мероприятий заключается в составлении перечня показателей, характеризующих рассматриваемые проекты. Эти показатели определяют разнообразные и, возможно, разнородные особенности проектов, которые считаются важными для проведения оценки. Необходимо, чтобы набор показателей максимально полно отражал цели организации. Обычно рекомендуется в состав показателей включать те, которые характеризуют объем выполненных работ, объем незавершенных работ, планируемые энергетические затраты проектируемого изделия, наличие неисследованных проблем, имеющийся зарубежный уровень исследований, наличие экспериментальных данных по использованию прототипа изделия или его опытного образца, влияние на природу, уровень безопасности, оценку времени на выполнение работ для получения опытных образцов и времени до начала возможного серийного производства, оценку времени окупаемости проекта и др. Состав набора показателей может отличаться для разных рассматриваемых предметных областей использования проектов.

Ниже будет рассмотрен пример предметной области по разработке и внедрению инновационных энергоэффективных средств и технологий, в частности, использование альтернативных видов энергии для тяги поездов. Для этого примера будет представлен возможный перечень таких показателей. Заметим, что показатели должны отражать не только снижение затрат

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

энергии, но и другие аспекты, касающиеся эффективности перевозочного процесса и его клиентоориентированности в соответствии с целями организации.

В третьем блоке мероприятий для каждого показателя из выбранного перечня формируются шкалы измерений. Предлагается рациональным измерять их в дискретных шкалах, так как показатели существенно разнородны, например, имеющих вид оценок «Неудовлетворительно», «Удовлетворительно», «Хорошо», «Отлично», либо, например, по цветам светофора: «Красный», «Желтый», «Зеленый». При отсутствии достаточно точных количественных значений показателей или в случае качественного характера показателей шкалы формируются экспертным путем.

В четвертом блоке мероприятий устанавливается порядок попарной свертки показателей в виде дерева свертки. По возможности рекомендуется при выборе показателей для попарной свертки формировать осмысленные характеристики промежуточных показателей.

Наконец, *в пятом блоке* заполняются значения матриц свертки, соответствующие вершинам построенного дерева.

2.2. ПРИМЕР СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ПРОЕКТОВ

Рассмотрим применение системы комплексного оценивания и классификации проектов на примере использования альтернативных видов энергии для тяги поездов.

В настоящее время в Холдинге РЖД используются локомотивы двух типов: электровозы с тяговыми электродвигателями, получающими энергию из контактной электросети, и тепловозы с дизельными двигателями на дизельном топливе. Замещение углеводородного топлива альтернативными источниками является одним из важнейших направлений повышения энергоэффективности перевозок [10, 17, 24, 31].

Блок 1. Список проектов.

Обзор возможностей использования других видов топлива для тяги локомотивов позволяет выявить следующие варианты:

синтетическое жидкое топливо; природный газ; твердое топливо; водородные топливные элементы; локомотив с ядерной силовой установкой. Сюда же следует отнести перспективные инновационные транспортные технологии: магнитолевитационную и вакуумно-левитационную.

Кратко охарактеризуем имеющиеся научно-технические задачи и проблемы, которые необходимо решить в ходе реализации проектов по применению альтернативных видов топлива.

Синтетическое жидкое топливо. Имеется в виду применение всевозможных видов синтетического жидкого топлива, получаемого из растительного сырья [6, 8, 13, 18, 19]. Проведенные исследования [6, 8, 13] показали возможность применения этих видов топлива в тяговых установках локомотивов. Главным недостатком синтетических топлив является меньшая по сравнению с дизельным топливом теплота сгорания и, как следствие, больший расход топлива. Проблемой является разработка и внедрение технологий синтеза топлива и обеспечение производства сырьем.

Природный газ. Его использование возможно в сжатом и сжиженном состояниях.

Брянским заводом был построен и прошел испытания образец маневрового газотепловоза ТЭМ18Г на сжатом природном газе. Испытания показали, что пробег локомотива сильно ограничивается размерами емкостей для топлива, т.е. сжатый газ может применяться на локомотивах с ограниченным радиусом действия [6]. Эксплуатация тепловозов на сжиженном газе требует обеспечения заправочных станций мощными компрессорными станциями.

Перспективным является использование тяговым подвижным составом сжиженного природного газа.

Во ВНИКТИ были созданы и переданы в опытную эксплуатацию магистральный газотурбовозы ГТ1h-001 (2009) и ГТ1h-002, маневровый газотепловоз ТЭМ19 [7].

Основные проблемы применения сжиженного газа связаны, с эксплуатацией криогенной техники, а также организации производства и снабжения сжиженным газом железнодорожного транспорта в необходимых размерах.

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

Твердое топливо. Имеется опыт создания газогенераторных тепловозов и их эксплуатации на железных дорогах СССР и КНР. Газификации угля на транспортных газогенераторах происходит менее эффективно, чем в стационарных условиях, что связано с ограничением локомотивов по габаритам и весу [6].

Эксплуатация газотурбинного локомотива на твердом топливе может быть осуществлена двумя путями: на генераторном газе (аналогично газогенераторным тепловозам) и на основе пылеугольного способа сжигания [6].

Для газогенераторного газотурбовоза требуется газогенератор большей производительности, чем для тепловозов.

Для газотурбовоза с локомотивом на пылеугольном топливе актуальна задача повышения качества и полноты сгорания твердого топлива. Её решение возможно при реализации следующих способов сжигания:

- сжигание угольной пыли в циклонной топке;
- двухступенчатое сжигание угля в топке парового котла – газификация в слое при недостатке воздуха и последующее сжигание газовой смеси;
- сжигание угольной пыли в «кипящем» слое при температуре порядка 850°C по типу стационарных парогенераторов.

Газотурбинная локомотивная установка на пылеугольном топливе требует предварительной подготовки пылевидного угля в стационарных условиях или на самом локомотиве.

Сжигание пылеугольного топлива сопровождается интенсивным износом лопаток турбины.

Основные проблемы использования твердого топлива для локомотивных энергетических установок связаны с необходимостью повышения к.п.д. двигателей, обеспечения надежности и срока службы газогенератора, турбин, уменьшения дополнительных расходов на устройства и операции по хранению, предварительной подготовки угля, его загрузке.

Локомотив на топливных элементах. Прототип поезда на водородных топливных элементах был разработан в Японии. Поезд может развивать скорость 120 км/ч, дальность пробега на одной заправке – 300–400 км. В США был разработан опытный образец локомотива на водородных топливных элементах мощ-

ностью 2 тыс. л. с. «Водородный» поезд в Дании курсирует по маршруту 59 км, что ограничено ёмкостью водородных баков [8, 13].

Во ВНИИЖТ [12] был выполнен ряд проектов создания подвижного состава, работающего на водороде (дрезины, рельсового автобуса, автомотрисы, энерговагона и локомотива). В настоящее время разрабатывается вагон-электростанция для путевой техники, работающей в тоннелях.

Двигатели на водородных топливных элементах обладают большим количеством преимуществ. Однако для их применения на локомотивах необходимо решить ряд сложных задач:

- разработки технологии хранения водорода;
- разработки стандартов безопасности, хранения, транспортировки, применения и т.д.
- создания «водородной» инфраструктуры.

Локомотив с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ). Конструктивная схема локомотива с ядерной силовой установкой (атомовоза) с реактором на быстрых нейтронах типа БОР-60В была разработана в 1983-1985 гг. Всероссийским научно-исследовательским тепловозным институтом (ВНИТИ), Коломенским заводом при участии ряда других организаций [1]. Были проработаны варианты компоновки энергетической установки, которая может быть использована в качестве локомотива (газотурбовоза) или передвижной электростанции. Дальнейшие работы были прекращены.

Для создания и использования локомотивов с ЯЭУ требуется решение большого числа проблем, в первую очередь связанных с безопасностью их эксплуатации, обслуживания и ремонта, громоздкостью и весовыми характеристиками, переменным режимом работы локомотива и многими другими вопросами по обеспечению герметичности, надежности и прочности трубопроводов и соединений, природоохранными мероприятиями, созданием инфраструктуры обслуживания.

Перспективные транспортные технологии. Проведенные к настоящему времени исследования показывают перспективность использования магнитолевитационной и вакуумно-

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

левитационной транспортных технологий, однако их создание требует решения целого ряда фундаментальных задач.

Для транспортной технологии, основанной на использовании линейного электродвигателя и магнитного подвеса (магнитолевитационной технологии) [10], необходимы:

- создание материалов для высокотемпературной сверхпроводимости;

- создание электромагнитов, двигателей, высоковольтных выключателей, накопителей электроэнергии индуктивного типа с элементами высокотемпературной сверхпроводимости;

- разработка конструкционных композиционных материалов с применением нанотехнологий и технологий по изготовлению изделий из них;

- разработка автономных источников энергии большой мощности и энергоемкости для бортовых источников питания, включая водородные топливные элементы и малые ядерные установки;

- разработка высоковольтных полупроводниковых преобразователей и других электронных компонентов большой мощности и др.

Для вакуумно-левитационного транспорта [10, 23, 32] необходимы:

- исследование аэродинамических характеристик вакуумно-левитационного транспорта в разреженной среде;

- определение параметров и конструкционных решений обеспечения вакуумной среды с учетом оптимизации затрат;

- изучение динамики движения (устойчивость транспортных средств, нагрузки, перегрузки при маневрах и др.);

- изучение пассивных и активных методов стабилизация и управления подвижным составом в процессе движения;

- исследование и расчет механических напряжений, возникающих на поверхности движущейся капсулы и трубы;

- определение параметров и конструкционных решений обеспечения вакуумной среды;

- определение предельных температур конструкции и обслуживания вакуумно-левитационного транспорта, а также спо-

способности системы терморегуляции вакуумно-левитационного транспорта обеспечить тепловой режим в заданном диапазоне;

– исследование вопросов теплообмена при движении транспортного средства в вакуумной среде и др.

Большие затраты потребуются для создания транспортной инфраструктуры. Также необходима разработка комплексной системы обеспечения безопасности на основе непрерывной диагностики и защиты пассажиров и грузов от влияния негативных факторов (магнитное излучение, перегрузки при разгоне и торможении, перепад давлений и температур и т.д.).

Блоки 2 и 3. Показатели и шкалы их измерений.

Выбор состава показателей для классификации проектов осуществляется на основе анализа стратегических целей организации и оценки степени влияния ожидаемой энергоэффективности рассматриваемых проектов на эти показатели. Для наглядности и интерпретируемости системы классификации, по возможности, желательно использовать ограниченное число показателей. Ниже приведен пример, в котором установлено 8 показателей.

Таблица 1. Перечень показателей и шкалы их измерений

№	Наименование показателя	Шкала измерения показателя
1.	Ожидаемое снижение удельных энергозатрат на единицу перевезенного груза и единицу расстояния	1, 2, 3, 4
2.	Стадия выполнения работ	1, 2, 3
3.	Безопасность средства или технологии	1, 2, 3
4.	Ожидаемый срок окупаемости	1, 2, 3
5.	Капитальные вложения	1, 2, 3, 4
6.	Риск невыполнения	1, 2, 3
7.	Срок внедрения	1, 2, 3
8.	Дисконтированное снижение энергозатрат на период жизненного цикла технологии	1, 2, 3, 4

Первый показатель определяет ожидаемую удельную эффективность проекта по энергосбережению. Шкала по этому

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

показателю имеет 4 значения: 1 – неудовлетворительная эффективность, при которой проект исключается от рассмотрения; 2 – возможно включение проекта при условии хороших значений других показателей; 3 – удовлетворительное значение показателя; 4 – хорошее значение показателя.

Второй показатель характеризует, на какой стадии исследований или производства находится проект. Предлагается установить три значения для этого показателя: 1 – проект находится на стадии НИР и концептуальных разработок; 2 – проект преимущественно находится на стадии опытно-конструкторских разработок; 3 – по проекту созданы опытные образцы.

Третий показатель определяет степень безопасности разрабатываемой технологии. Значение 1 означает, что вопросы безопасности не решены; значение 2 означает в целом удовлетворительный уровень безопасности и влияния на окружающую среду, но имеются отклонения, которые могут быть устранены без существенных затрат; значение 3 означает, что средство или технология по рассматриваемому проекту удовлетворяет требованиям безопасности и природоохранным мероприятиям.

Четвертый показатель характеризует срок окупаемости после предполагаемого начала промышленной эксплуатации средства или технологии. Значение 1 означает окупаемость более 15 лет; значение 2 – окупаемость не более 10 лет; значение 3 означает окупаемость менее 5 лет.

Пятый показатель характеризует степень затрат на создание промышленного образца и необходимой инфраструктуры для эксплуатации средства или технологии. Значение 1 означает объем затрат существенно превышающий возможности организации и заинтересованных структур по финансированию проекта; 2 – проект требует значительных вложений организации и заинтересованных структур вложений; 3 – проект может быть выполнен за счет крупных, но допустимых вложений в его финансирование; 4 – проект не требует крупных вложений для реализации.

Шестой показатель характеризует риски невыполнения проекта из-за внешних и внутренних неблагоприятных условий и недостаточного обоснования надежности проекта: 1 – риск

невыполнения очень высокий; 2 – риск невыполнения умеренный; 3 – риск невыполнения проекта незначительный.

Седьмой показатель определяет предполагаемый срок начала внедрения технологии: 1 – неприемлемо большой срок; 2 – условно приемлемый срок; 3 – приемлемый срок.

Восьмой показатель определяет характеристики энергоэффективности изделия или технологии в течение их жизненного цикла с учетом дисконтирования доходов. Значение 1 соответствует низкому снижению затрат; 2 – удовлетворительному снижению затрат, сопоставимому с вложениями в реализацию проекта; 3 – хорошая энергоэффективность; 4 – снижение энергозатрат значительно превышает затраты на реализацию и внедрение результатов проекта.

Как показывает приведенное описание показателей, оценки по ним должны осуществляться с привлечением экспертов.

Каждый из приведенных показателей может, в свою очередь, рассчитываться на основе свертки соответствующего набора индикаторов, детализирующих данный показатель.

Заметим, что приведенные оценки показателей носят не количественный, а качественный характер и осуществляются до разработки финансовой модели проекта. Финансовая модель проекта разрабатывается после принятия решения о рассмотрении проекта для участия в разработке.

Таблица 2. Пример выбора значений показателей для проектов

№	Наименование проекта	Значения показателей							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Синтетическое жидкое топливо	2	3	3	2	3	3	3	2
2.	Природный газ в сжатом состоянии	3	3	3	2	3	3	3	3
3.	Природный газ в сжиженном состоянии	4	3	3	3	4	3	3	4
4.	Твердое топливо	3	3	3	3	3	3	3	4
5.	Топливные элементы	4	2	3	3	3	3	3	3
6.	Ядерная установка	3	1	1	2	1	1	1	2
7.	Магнитолевитационная технология	3	3	3	2	3	3	2	3
8.	Вакуумнолевитационная технология	4	2	2	3	3	2	2	4

Блок 4. Структура дерева свертки показателей.

Структура дерева свертки устанавливается экспертами, в том числе пользователями системы комплексного оценивания проектов (рис. 1). Для получения промежуточного показателя целесообразно сворачивать близкие по содержанию показатели, например, свертка 5-го и 8-го показателей (см. таблицу 1) характеризует прибыльность оцениваемого проекта.



Рис. 1. Дерево свертки показателей

Блок 5. Описание матриц свертки.

Ниже приведен пример построения матриц свертки, рис. 2. Номер строки определяется первым показателем, поступающим на вход соответствующего блока свертки, а номер строки – значением второго показателя. Значения элементов матриц свертки устанавливается экспертным путем на этапе настройки системы комплексного оценивания для заданной предметной области, в данном случае для оценки перспективности проектов по созданию средств и технологий по использованию новых видов энергии для тяги поездов.

Матрица свертки А.				
	Вход 8			
Вход 5	4	4	3	2
	3	3	3	2
	3	3	2	1
	2	1	1	1

Матрица свертки Б				
	Вход 7			
Вход 4	3	3	2	
	3	2	1	
	2	1	1	

Матрица свертки В				
	Вход 6			
Вход 2	3	2	1	
	2	2	1	
	1	1	1	

Матрица свертки Г				
	Вход А			
Вход 1	4	3	2	1
	4	3	2	1
	3	2	1	1
	2	1	1	1

Матрица свертки Д				
	Вход В			
Вход 3	4	3	1	
	3	2	1	
	1	1	1	

Матрица свертки Е				
	Вход Д			
Вход Б	4	3	1	
	3	2	1	
	2	1	1	
	1	1	1	

Матрица свертки итоговой оценки				
	Вход Е			
Вход Г	4	3	2	1
	3	3	2	1
	3	2	1	1
	2	2	1	1

Рис. 2. Матрицы свертки показателей

2.3. ФОРМЫ УЧАСТИЯ ОРГАНИЗАЦИИ В ПРОЕКТАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ КЛАССИФИКАЦИИ

В приведенной ниже таблице представлены результаты расчетов значений оценок для рассматриваемых проектов. Итоговая оценка позволяет разбить проекты на классы, описывающие перспективность проектов, и служить основой для принятия решений по форме участия организации в разработке проектов.

*Программы и системы моделирования объектов,
средств и систем управления*

Таблица 3. Пример расчета значений промежуточных и итоговой оценок для проектов

№	Наименование проекта	Значения промежуточных и итоговой оценок						
		А	Б	В	Г	Д	Е	Итоговая оценка
1.	Синтетическое жидкое топливо	3	1	3	2	4	1	1
2.	Природный газ в сжатом состоянии	3	3	3	2	4	3	2
3.	Природный газ в сжиженном состоянии	4	3	3	4	4	4	4
4.	Твердое топливо	3	3	3	3	4	4	3
5.	Топливные элементы	3	3	2	3	3	3	3
6.	Ядерная установка	2	1	1	2	1	1	1
7.	Магнитолевитационная технология	3	2	3	3	4	3	3
8.	Вакуумно-левитационная технология	3	2	3	3	4	3	3

Так, например, относительно проектов с номерами 1 и 6 может быть принято решение о неучастии организации в их разработке. По проекту с номером 2 может рассматриваться участие в предоставлении грантов на исследование в случае появления новых прорывных идей. По проектам с номерами 4, 5, 7, 8 возможно предоставление субсидий на проведение работ по отдельным составляющим проектов в рамках финансирования с участием других заинтересованных организаций. По проекту с номером 3 возможно активное участие организации в финансировании.

Заметим, что приведенная процедура предварительного отбора проектов может служить исключительно как система поддержки принятия решений с использованием и обработкой мнений экспертов. Окончательное решение о степени участия организации в инвестировании рассматриваемых проектов должно рассматриваться на основе дальнейшего построения финансовой модели и бизнес-плана наиболее перспективных проектов, а также с использованием методик, представленных

в стандартах и распорядительных документах организации, в том числе [14–16].

Отметим, что для выделения наиболее перспективных проектов из некоторого класса можно применить проиллюстрированную выше процедуру классификации для упорядочения проектов по приоритетности внутри этого класса. Для этого по аналогии с методикой, представленной на примере выше, формируется новый перечень исходных показателей, структура и матрицы свертки.

3. Механизмы распределения финансовых ресурсов для сложных проектов

Приведенная выше процедура предварительной оценки проектов позволяет выделить группу приоритетных проектов. Самый высокий приоритет имеют проекты, попавшие в группу с итоговой оценкой 4, далее с оценкой 3 и т.д.

Рассмотрим задачу формирования инвестиционной программы на основе предварительной оценки проектов. Как было отмечено выше, проекты могут находиться на разных стадиях исследования или производства (стадия НИР и потенциальных разработок, стадии опытно-конструкторских работ, стадии серийного производства и т.д.). Очевидно, что нам необходим определенный инновационный потенциал на каждой стадии. Определим объемы финансирования роста потенциала разработок на каждой стадии экспертным путем. Для этого можно применить механизм согласия [5, 11].

Суть механизма в том, что создаются две экспертные комиссии. Первая комиссия дает оценку s_1 относительного финансирования проектов стадии 1 по сравнению с финансированием проектов стадии 3. Вторая комиссия также дает оценку s_2 относительного финансирования проектов стадии 2 по сравнению с проектами стадии 3. На основе этих оценок определяется финансирование различных стадий:

$$x_1 = Rs_1 / (1 + s_1 + s_2),$$

$$x_2 = Rs_2 / (1 + s_1 + s_2),$$

$$x_3 = R / (1 + s_1 + s_2),$$

где R – величина инвестиционного фонда. В теории активных систем при условии достаточной заинтересованности доказано [5], что каждой экспертной группе выгодно предоставлять достоверную оценку, определяющую ее согласованное мнение. Для обеспечения условия достаточной заинтересованности необходимо в каждую экспертную группу включить экспертов, заинтересованных как в росте потенциала серийных образцов, так и в росте потенциала разработок соответствующей стадии.

После определения объемов финансирования каждой стадии решается задача формирования инновационной программы. Задача решается независимо для проектов каждой стадии. Сначала для каждой стадии рассматриваются проекты, имеющие интегральную оценку 4.

Если ресурсов, выделенных для соответствующей стадии, хватает для всех проектов, имеющих оценку 4, то рассматриваются проекты, имеющие оценку 3, и т.д. в соответствии с формами участия проектов, описанных выше.

Рассмотрим алгоритмы решения задач формирования инвестиционной программы для каждой отдельной стадии.

Предположим, что фиксирован набор $N = \{1, 2, \dots, n\}$ мероприятий (проектов) и для каждого из них известны затраты x_i и доход y_i от реализации. Эффективность реализации проекта определяется как отношение дохода к затратам. Предложим механизм нахождения портфеля проектов (подмножества множества N), реализация которых даст максимальный суммарный доход при условии, что суммарные затраты на реализацию проектов портфеля не превысят имеющихся средств R .

В случае неделимых и независимых проектов (как возможность независимой реализации проектов, так и независимость эффективности проектов от итогового списка выбранных проектов) реализация механизма включает в себя решение NP-трудной задачи упаковки рюкзака. Для решения практических задач в этом случае используются эвристические алгоритмы.

Одним из таких алгоритмов является «жадный алгоритм». Вычисление оптимального решения задачи формирования инвестиционной программы при жадном алгоритме заключается в следующем (метод «затраты–эффект» [9]): упорядочить проекты по убыванию эффективности и включить в портфель проекты последовательно, начиная с первого (имеющего максимальную эффективность) до тех пор, пока не закончится весь ресурс. Результатом отбора будет выполнение полностью какого-то количества проектов и, возможно, неполное выполнение ровно одного проекта. Для непрерывной задачи это даст оптимальное решение, а для случая неделимых проектов мы ищем в списке еще неотобранных проектов, отсортированных по эффективности, тот проект, для которого достаточно оставшегося бюджета, выбираем его, уменьшаем соответственно величину оставшегося бюджета и повторяем шаг до тех пор, пока не останется проектов, для которых было бы достаточно оставшегося к тому моменту бюджета.

Описанная выше процедура существенно использует условие независимости реализации проектов и независимость эффективности проектов, однако на практике это может не выполняться: выполнение проекта может быть возможно только при условии предварительного выполнения других проектов и/или же при совместном выполнении проектов эффективность проектов изменится за счет синергии.

Рассмотрим комплексный проект, включающий совокупность проектов, связанных между собой так, что результат выполнения некоторых проектов может зависеть от результатов выполнения других проектов.

Пусть фиксирован набор $I = \{1, 2, \dots, n\}$ мероприятий (проектов) и размер имеющегося фонда ресурсов R . Для каждого проекта $i \in I$ определены

- значение результата u_i ,
- величина затрат x_i на реализацию проекта (получение результата),

Задача заключается в выборе множества проектов M так, чтобы эффект от их выполнения был максимальным при заданном количестве ресурсов на их выполнение R при условии, что

между проектами существуют связи и их можно представить в виде одного или нескольких деревьев таким образом, чтобы для каждого проекта можно было легко выделить зависимые от него проекты, т.е. проекты, которые без него нельзя выполнить.

Идея эвристического алгоритма, решающего задачу, заключается в последовательном решении задач с монотонно уменьшающимся количеством проектов. Для каждой задачи выбирается наиболее эффективный проект или группа проектов и выделяются на них средства, если этот проект или группа проектов оказываются полностью выполнены, то они исключаются из рассмотрения, и затем решается та же задача, но уже для меньшего количества ресурсов и проектов.

Входные данные алгоритма:

- множество проектов N ;
- размер имеющегося фонда ресурсов R ;
- связи между проектами в множестве I .

Выходные данные алгоритма:

- множество отобранных проектов m .

Алгоритм.

1. Обозначаем:
 - а. Номер текущей решаемой задачи t .
 - б. Множество доступных для выбора проектов N^t в задаче t .
 - в. Доступный ресурс R^t в задаче t .
 - г. Множество ранее отобранных проектов J^t в задаче t .
 - д. Процедуру $J(k, M)$, которая для каждой пары «проект k , множество проектов M » выдает множество проектов, для которых выполняются два условия: 1) от них зависит проект k , 2) они принадлежат множеству M .
2. Выполняем инициализацию:
 - а. Первая решаемая задача имеет номер 1 ($t = 1$).
 - б. Множество доступных проектов в первой решаемой задаче совпадает с множеством всех проектов ($N^1 = N$).
 - в. Доступный ресурс в первой решаемой задаче совпадает с размером имеющегося фонда ($R^1 = R$).
 - г. Ранее отобранных проектов в первой решаемой задаче нет (J^1 – пустое множество).

3. Если доступных проектов нет (N^t пустое), то переходим на последний шаг алгоритма (шаг 12) для завершения работы алгоритма.

4. Для каждого проекта j , принадлежащего множеству N^t , вычислим значение его эффективности

$$k_j^t = \frac{\sum_{i \in J_{j, N^t}} y_i}{\sum_{i \in J_{j, N^t}} x_i}.$$

5. Выбираем любой из проектов с максимальной эффективностью, пусть его номер d .

6. Проверяем достаточно ли оставшегося ресурса для полного выполнения всех проектов, от которых зависит проект d . Если оставшегося ресурса достаточно, то проверяем достаточно ли будет его, чтобы дополнительно полностью выполнить проект d . Если нет – выделяем столько, сколько необходимо на выполнение всех проектов, от которых зависит проект d , а на сам проект d выделяем то, что останется.

а. Добавляем в множество ранее отобранных проектов J^1 проект d и те проекты, от которых он зависит и которые еще не были отобраны, и переходим на последний шаг алгоритма (шаг 12) для завершения работы алгоритма.

7. Проверяем достаточно ли оставшегося ресурса для полной реализации проекта d . Если недостаточно и, более того, этого ресурса также недостаточно для полного выполнения всех проектов, от которых зависит проект d тогда,

а. Множество доступных для выбора проектов N^{t+1} в задаче $t + 1$ получаем удалением проекта d из множества доступных для выбора проектов N^t в текущей задаче t .

б. Доступный в задаче $t + 1$ ресурс R^{t+1} оставляем тем же, что и доступный в задаче $t + 1$ ресурс R^t .

в. Множество ранее отобранных проектов J^{t+1} в задаче $t + 1$ оставляем тем же, что и множество ранее отобранных проектов J^t в задаче t .

г. Увеличиваем значение номера текущей задачи на 1 ($t := t + 1$)

*Программы и системы моделирования объектов,
средств и систем управления*

- д. Переходим к шагу 3 для начала решения следующей задачи.
8. Проверяем достаточно ли оставшегося ресурса для полной реализации проекта d . Если для реализации проекта d требуется выполнение еще нереализованных проектов, то необходимо учесть расходы и на их реализацию. Если ресурса достаточно, то формируем входные данные для выполнения следующей задачи. Присваиваем ей номер $t+1$. Множество отобранных проектов J^{t+1} в этой задаче будет состоять из: множества отобранных проектов J^t в задаче t , проекта d , множества всех проектов, от которых проект d зависит. Формируем входные данные для следующей задачи:
- а. Доступный ресурс R^{t+1} в задаче $t + 1$ определяется следующим образом. Из ресурса R^t , доступного в задаче t , вычитается требуемое количество ресурса для реализации проекта d . Если для реализации проекта d требовалось выполнение еще нереализованных проектов, то расходы на эти проекты также вычитаются.
 - б. Множество доступных для выбора проектов N^{t+1} в задаче $t + 1$ получаем из множества доступных для выбора проектов N^t в текущей задаче t , но не включаем элемент с номером d и все проекты, от которых он зависит.
9. Увеличиваем значение номера текущей задачи на 1 ($t := t + 1$).
10. Переходим к шагу 3 для начала решения следующей задачи.
11. Завершаем алгоритм. Списком отобранных проектов является множество J^t ($m = J^t$), при этом некоторые отобранные проекты могут оказаться обеспеченными ресурсом не полностью.

Описанный алгоритм отбора приоритетных проектов и распределения между ними финансирования является развитием метода «затраты–эффект» [9] на случай комплекса связанных между собой проектов.

Так же, как и метод «затраты–эффект» [9], который по сути является аналогом «жадного» алгоритма для приближенного решения задачи о рюкзаке, описанный выше алгоритм для распределения финансовых средств при заданной древовидной структуре связей между проектами, применяемый для совокуп-

ности независимых проектов, дает приближенное решение. Определение условий его оптимальности и оценка отклонений эффективности решений описанного эвристического алгоритма от эффективности оптимального решения требует дальнейших исследований.

Применение описанных выше механизмов выстраивается в следующую цепочку действий:

- формируется множество потенциальных для рассмотрения проектов, которые затем разбиваются на 4 класса;

- между классами проектов осуществляется распределение финансирования на основе механизмов согласия;

- проекты из каждого класса разбиваются на систему подпроектов, имеющих самостоятельную ценность, строится дерево взаимосвязей подпроектов, характеризующих порядок их выполнения (определяются цепочки последовательного выполнения подпроектов и оценка возможностей их параллельного выполнения);

- для каждого из подпроектов внутри каждого класса осуществляется оценка их эффекта, оценка эффекта совокупностей связанных подпроектов и требуемых финансовых ресурсов в соответствии с построенным деревом связей;

- на основе предложенного алгоритма распределения имеющегося бюджета на выполнение проектов в каждом классе определяется инвестиционная программа.

4. Заключение

В статье рассмотрен пример оценивания, классификации, отбора приоритетных проектов на примере задач разработки средств и технологий использования альтернативных видов энергии для тяги поездов. На данном примере проиллюстрирована методика подготовки предварительного отбора и упорядочения проектов по их приоритетности.

Перечень исходных показателей для отбора проектов для реализации сформирован на основе учета основных направлений целевой структуры управления инновационным и научным комплексом организации. Набор этих показателей вместе с

Программы и системы моделирования объектов, средств и систем управления

предложенной процедурой комплексного оценивания может быть принят в качестве системы ключевых показателей эффективности научного комплекса организации.

Предложенная структура оценивания проектов и их классификации может служить одним из инструментов проведения экспертизы и научно-технологического сопровождения (мониторинга) комплексных научно-технических проектов и долгосрочных стратегических научных и инновационных программ.

Описанный механизм распределения ресурсов может быть использован при формировании инвестиционных программ инновационного и научного комплекса организации.

Во второй части статьи будут рассмотрены модели стимулирования реализации энергоэффективных проектов в составе мультипроектной структуры, а также представлены возможности по формированию отдельных элементов структуры управления научно-техническим комплексом организации.

Литература

1. *Атомовоз. Поезд на атомной тяге в СССР и России* // МИР АЭС. – URL: miraes.ru/atomovoz-poezd-na-atomnoy-tyage-sssr-rossia.
2. БУРКОВ В.Н., ГРАЦИАНСКИЙ Е.В., ЕНАЛЕЕВ А.К., УМРИХИНА Е.В. *Организационные механизмы управления научно-техническими программами*. – М.: Изд-во ИПУ РАН, 1993. – 64 с.
3. БУРКОВ В.Н., КОНДРАТЬЕВ В.В., ЦЫГАНОВ В.В., ЧЕРКАШИН А.М. *Теория активных систем*. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
4. БУРКОВ В.Н., КОРОБЕЦ Б.Н., МИНАЕВ В.А., ЩЕПКИН А.В. *Модели, методы и механизмы управления научно-техническими программами*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 205 с.
5. БУРКОВ В.Н., НОВИКОВ Д.А. *Как управлять организациями*. – М.: Синтег, 2004. – 400 с.

6. ВОЛОДИН А.И., ЗЮБАНОВ В.З., КУЗЬМИЧ В.Д. и др. *Локомотивные энергетические установки*. – Учебник для вузов ж.-д. трансп. / Под ред. А.И. Володина– М.: ИПК «Желдориздат», 2002. – 718 с.
7. ГАПАНОВИЧ В.А., КИРЖНЕР Д.Л., КОССОВ В.С., БОБКОВ Ю.В., ПРОХОР Д.И., ЧЕРНЫШЕВ М.А., ГРАЧЕВ Н.В., НИКОНОВ В.А. *Создание современных локомотивов на сжиженном газе* // Локомотив. – 2017. – №8. – С. 2–9.
8. ГРИГОРОВИЧ Д.Н. *Использование альтернативных видов топлива и энергоустановок на железнодорожном транспорте* // Промышленный транспорт XXI век. – 2012. – №3. – С. 21–24.
9. ДРАНКО О.И. *Метод «Затраты-эффективность» как инструмент выбора приоритетных проектов предприятий* // Управленческий учет. – 2011. – №4 – С. 15–20.
10. ЛАПИДУС Б.М., МИШАРИН А.С., МАХУТОВ Н.А., ФОМИН В.М., ЗАЙЦЕВ А.А., МАЧЕРЕТ Д.А. *О научной платформе стратегии развития железнодорожного транспорта в России до 2050 года* // Бюллетень Объединенного учёного совета ОАО «РЖД». – 2017. – №2. – С. 1–20.
11. *Механизмы управления* / Под ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2011. – 192 с.
12. НАЗАРОВ О.Н. *Использование новых источников энергии в тяговом обеспечении* // Труды научно-практической конференции «Инновационные проекты, новые технологии и изобретения. инновации-2005», Щербинка, 27-28 октября 2005 г. – С. 42–44.
13. САЛАЩЕНКО О. *Альтернативные источники энергии для локомотивов* // Локомотив-информ. –2013. – № 4. – С. 20–23.

*Программы и системы моделирования объектов,
средств и систем управления*

14. *СТО РЖД 08.005-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок оценки эффективности инновационных проектов* (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).
15. *СТО РЖД 08.007-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Управление реализацией научно-технических работ* (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).
16. *СТО РЖД 08.015-2011. Стандарт ОАО «РЖД». Инновационная деятельность в ОАО «РЖД». Порядок рассмотрения инновационных проектов* (утвержден и введен в действие распоряжением ОАО «РЖД» от 26.06.2012 №1267р).
17. BARRETT S. (ed.) *European Expert Group reports on future transport fuels // Fuel Cells Bulletin*. – February 2011. – Vol. 2011, Iss. 2. – P. 12–16.
18. BAUTISTAC S., NARVAEZ P., CAMARGO M., CHERY O., MOREL L. *Biodiesel-TBL+: A new hierarchical sustainability assessment framework of PC&I for biodiesel production – Part I // Ecological Indicators*. – 2016. – Vol. 60. – P. 84–107.
19. BAUTISTAC S., ENJOLRAS M., NARVAEZ P., CAMARGO M., MOREL L. *Biodiesel-triple bottom line (TBL): A new hierarchical sustainability assessment framework of principles criteria & indicators (PC&I) for biodiesel production. Part II-validation // Ecological Indicators*. – 2016. – Vol. 69. – P. 803–817.
20. BILGIN G., EKEN G., OZYURT B., DIKMEN I., BIRGONUL M.T., OZORHON B. *Handling project dependencies in portfolio management // Procedia Computer Science*. – 2017. – Vol. 121. – P. 356–363.
21. BOYLE G. *Design project management*. – London: Routledge, 2018. – 208 p.
22. CLEDEN D. *Managing project uncertainty*. – London: Routledge, 2017. – 146 p.

23. DUDNIKOV E.E. *Advantages of a new Hyperloop transport technology* // 10th Int. Conference Management of Large-Scale System Development – 2017 (MLSD–2017), 2-4 October, Moscow, Russia. – 2017. – P. 1–4
24. FENG J., CHU W.Q., ZHANG Z., ZHU Z.Q. *Power electronic trans-former-based railway traction systems: Challenges and opportunities.* // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2017. – Vol. 5(3). – P. 1237–1253.
25. ENGEL D.W., DALTON A.C., ANDERSON K., SIVARAMA-KRISHNAN C., LANSING C. *Development of Technology Readiness Level (TRL) Metrics and Risk Measures* // Pacific Northwest National Laboratory. – 2012. – 17 p.
26. HARRISON F., LOCK D. *Advanced Project Management* // London: Routledge, 2004. – 336 p.
27. HICKS B., LARSSON A., CULLEY S., LARSSON T. *A methodology for evaluating technology readiness during product development.* – Stanford University, California, USA: Design Society, 2009. – P. 157–168.
28. KERZNER H. *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 11th Edition.* – Wiley, 2017. – 1296 p.
29. KERZNER H. *Project management best practices: Achieving global excellence.* – John Wiley & Sons, 2018. – 544 p.
30. MANKINS J.C. *Technology readiness assessments: A retrospective* // Acta Astronautica. – 2009. – Vol. 65. – P. 1216–1223.
31. SOBIN N., MOLENAAR K., CAHILL E. *Mapping goal alignment of deployment programs for alternative fuel technologies: An analysis of wide-scope grant programs in the United States* // Energy Policy. – 2012. – Vol. 51. – P. 405–416.
32. YAOPING ZHANG Y., OSTER D., KUMADA M., YU J., LI S. *Key vacuum technology issues to be solved in evacuated tube transportation* // Journal of Modern Transportation. – June 2011. – Vol. 19, Iss. 2. – P. 110–113.

**MODELS AND MANAGEMENT STRUCTURE OF
INNOVATIVE TECHNOLOGIES DEVELOPMENT AND
IMPLEMENTATION. PART I: MECHANISMS OF
PRIORITY PROJECTS SELECTION AND RESOURCE
DISTRIBUTION**

Vladimir Burkov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Doctor of Science, chief researcher (vlab17@bk.ru).

Anver Enaleev, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, PhD, senior researcher (anverena@mail.ru).

Vladimir Strogonov, NIIS, Moscow, Doctor of Science (v.strogonov@vniias.ru).

Denis Fedyanin, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, junior researcher (dfedyanin@inbox.ru).

Abstract: The article consists of two parts. In the first part, we propose approaches for implementation of complex projects development to create innovative tools and technologies that ensure the energy efficiency at rail transport. We consider methods for evaluating and classifying projects according to their degree of feasibility and efficiency. We present the model and algorithm of resource planning for a set of projects.

Keywords: classification, level of development maturity, energy efficiency, allocation of funds, control, management, organization.

*Статья представлена к публикации членом
редакционной коллегии Я.И. Квинто.*

*Поступила в редакцию 18.04.2018.
Опубликована 31.07.2018.*