

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Для формально сформулированной задачи оптимизации рассмотрены основные достоинства и недостатки классических методов ее решения. Освещены основные предпосылки появления и история развития аппарата генетических алгоритмов. Проанализировано современное состояние библиографии, посвященной вопросам использования поисковых генетических алгоритмов. Рассмотрены основные идеи и принципы, лежащие в основе работы генетических алгоритмов. Выполнен обзор наиболее часто встречаемых генетических операторов: кроссинговера и мутации. Детально проанализированы базовые этапы работы классического генетического алгоритма. Рассмотрены основные способы кодирования решений в хромосомах, выбора пар особей для скрещивания, а так же представлены некоторые распространенные стратегии отбора. Сформулированы основные достоинства бинарного кодирования решений в хромосомах с применением кода Грея, а так же даны рекомендации по использованию вещественного кодирования решений в различных ситуациях. Описаны два основных класса параллельных генетических алгоритмов: «островов» и «мастер-рабочий». Приведен пример использования генетического алгоритма для оптимизации многоэкстремальной функции, зависящей от большого числа параметров. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие преимущества использования графических процессоров для вычислений в параллельных генетических алгоритмах. Изложены рекомендации по целесообразности применения генетических алгоритмов в различных ситуациях.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм, мягкие вычисления, генетические операторы, кодирование решений.

НОМЕНКЛАТУРА

BORF – Building and Optimization of Reconstructed Frame;

Pix – пиксель;

PIV – Particle Image Velocimetry;

ГА – генетический алгоритм;

ПГА – параллельный генетический алгоритм;

A – константа;

$[a_i, b_i]$ – диапазон действительных значений, которые может принимать оптимизируемый параметр;

dx – перемещение;

D – ограничения, выделяющие область допустимых решений;

E – функция ошибки;

g_i – целочисленное значение хромосомы;

K – количество разрядов (ген) для кодирования возможных решений в битовых строках (хромосомах);

m' – некоторое решение из области допустимых решений;

m'' – оптимальное решение;

M – пространство решений некоторой задачи;

M' – пространство допустимых решений некоторой задачи;

N – количество поколений в генетическом алгоритме;

P – популяция особей;

P_i – отдельная особь из популяции P ;

$P_{i,j}^k$ – потомок особей P_i и P_j ;

Pm_i – мутированная особь P_i ;

Q – целевая функция;

r_i – вещественное число, соответствующее закодированному в хромосоме g_i решению;

R – критерий оптимизации;

t – время работы генетического алгоритма;

V_x, V_y, V_z – проекции скорости течения на оси x, y, z ;

y – координата точки в потоке, по оси y ;

x_i, z_i – отдельные гены в хромосомах.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей своей эволюции человечество постоянно сталкивалось с различными задачами оптимизации. Поиск кратчайшего пути, оптимальное управление запасами топлива, разработка автоматизированных систем поддержки принятия решений, выбор геометрической формы кузова автомобиля, при которой сопротивление воздуха будет наименьшим – все эти задачи тем или иным образом затрагивают теорию оптимизации. Оптимизация в широком смысле слова находит свое применение не только -

Одним из перспективных направлений оптимизации являются генетические алгоритмы [1]. Несмотря на то, что впервые о них заговорили более 40 лет назад, они до сих пор продолжают развиваться и находят актуальное практическое применение в самых различных областях науки и техники.

Объектом исследования является процесс решения оптимизационных задач большого числа параметров, основанный на использовании генетических алгоритмов.

Предметом исследования являются операторы, модели, методы и стратегии, используемые в ГА.

Целью данной работы является анализ развития и текущего состояния аппарата генетических алгоритмов, а так же оценка целесообразности использования ГА с бинарным кодированием для поиска глобальных максимумов и минимумов многоэкстремальной функции большого числа параметров при решении различных оптимизационных задач.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть заданы $M, D: M' \subseteq M$, а также целевая функция Q , которая каждому значению $m' \in M'$ ставит в соответствие вещественное число из множества R (критерий оптимизации используется для сравнения альтернативных решений и выбора лучшего из них). Тогда модель задачи оптимизации описывается тройкой: $\langle M, D, Q \rangle$.

Требованием оптимизации является выражение:

$$Q(m') \rightarrow \min \text{ (или } Q(m') \rightarrow \max \text{)}. \quad (1)$$

Решение $m'' \in M'$, удовлетворяющее требованию оптимизации (1), называется оптимальным. Целью оптимизационной задачи является поиск оптимального решения m'' из множества всех допустимых решений. Довольно часто встречаются задачи, требующие оптимизации по нескольким критериям одновременно.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В связи с высокой распространенностью и важностью решения задач оптимизации в науке и технике, в настоящее время разработано довольно большое количество различных методов и алгоритмов поиска максимумов и минимумов. К ним можно отнести: поиск в ширину [1], метод дихотомии [1], метод градиентного спуска [2], метод золотого сечения [2] и т. д.

Все указанные выше методы оптимизации относятся к классическим. Они позволяют с высокой точностью решать большой класс задач, однако обладают и недостатками. Среди основных недостатков классических методов оптимизации следует отметить следующие:

- при оптимизации нелинейных функций возникает проблема локальных экстремумов, когда за истинное решение принимается не глобальный, а локальный экстремум;
- при увеличении числа одновременно оптимизируемых параметров резко возрастает вычислительная сложность и, как следствие, время вычислений.

Попытки преодоления указанных проблем привели к созданию теории генетических алгоритмов. Генетические алгоритмы – это поисковые алгоритмы, основанные на селекции и генетике [1]. Основателем теории генетических алгоритмов по праву считается американский

исследователь Джон Холланд, который в конце 1960-х годов предложил в качестве принципов комбинаторного перебора вариантов решения оптимизационных задач использовать методы и модели механизма развития органического мира на Земле. В 1975 году Холланд опубликовал свою самую знаменитую работу «Adaptation in Natural and Artificial Systems» [3]. В ней он впервые ввел термин «генетический алгоритм». Ученики Холланда – Кеннет Де Йонг и Дэвид Голдберг – продолжили его работу в области ГА. Наиболее известная работа Голдберга – «Genetic algorithms in search optimization and machine learning» [4].

Следует отметить, что генетические алгоритмы относятся к более общей группе методов, называемых эволюционными вычислениями [5]. В свою очередь эволюционные вычисления относятся к классу неточных, приближенных методов решения, часто называемых «мягкими вычислениями» [6].

Современная библиография по генетическим алгоритмам превышает 9000 наименований и продолжает увеличиваться. Однако работ, посвященных именно комплексному обзору теории ГА, учитывая важность и актуальность данного направления, все еще не хватает.

Одним из лучших русскоязычных современных трудов в области генетических алгоритмов является учебник Гладкова Л. А. [1]. В данном учебнике описаны фундаментальные основы ГА и эволюционного моделирования, представлены основные принципы, стратегии и концепции генетического поиска. Однако в качестве обзорного знакомства с ГА и областью их применения данный труд рассматривать не стоит, в связи с довольно большим объемом материалов, рассматриваемых в нем.

Среди наиболее известных работ в области ГА следует отметить статью Whitley D. A «Genetic algorithm tutorial» [7]. Данная работа носит обзорный характер и ее можно рекомендовать для ознакомительного знакомства с теорией генетических алгоритмов. К недостаткам этой статьи можно лишь отнести отсутствие современных примеров практического применения ГА в различных областях науки и техники (работа вышла более 20 лет назад).

В текущей работе попытаемся совершить краткий комплексный обзор основ теории оптимизации с использованием генетического поиска, и подкрепить теорию современными примерами использования аппарата ГА.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ГА базируются на теоретических достижениях синтетической теории эволюции и используют основные принципы эволюционной теории Ч. Дарвина [8]: наследственность, изменчивость и естественный отбор.

ГА оперируют совокупностью особей (популяцией), которые представляют собой строки (хромосомы), кодирующие одно из решений задачи. Этим ГА отличается от большинства других алгоритмов оптимизации, которые оперируют лишь с одним решением, улучшая его.

Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи. Для этого используется функция приспособленности [1] (целевая функция), которая выделяет наиболее приспособленные решения (в даль-

нейшем они продолжают использоваться) и наихудшие решения (удаляются из популяции и не влияют на дальнейший поиск оптимального решения). Таким образом, мы стремимся повысить приспособленность, а следовательно, и приблизиться к искомому решению.

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс. На каждой новой итерации над текущими особями применяются различные генетические операторы, которые порождают новые особи. После этого все особи оцениваются с помощью целевой функции и наиболее приспособленные используются на следующей итерации ГА. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты желаемые результаты, либо число итераций превысит пороговое значение (пороговое значение числа итераций позволяет ограничить сверху временные рамки работы алгоритма). Так же, одним из признаков того, что следует остановить итерационный процесс, является схождение популяции (состояние популяции, когда все ее особи на протяжении нескольких поколений находятся в области некоторого экстремума и почти одинаковы). Схождение популяции обычно указывает на то, что достигнуто решение близкое к оптимальному. Обычно итоговым решением задачи служит наиболее приспособленная особь последнего поколения.

Генетические операторы являются средством отображения одного множества на другое. Они позволяют применять принципы наследственности и изменчивости к виртуальным популяциям. Все генетические операторы обладают вероятностными характеристиками, что вносит некоторую степень свободы в работу ГА. Наиболее применяемыми генетическими операторами являются оператор кроссинговера (скрещивания) и оператор мутации.

Оператор кроссинговера моделирует процесс скрещивания особей. Этот генетический оператор приводит к созданию новых особей, на основе существующих. Простейшим вариантом скрещивания является односточечный кроссинговер. Перед началом его работы, выбираются две особи P_1, P_2 из популяции P , и случайным образом определяется точка разрыва в их хромосомах. Затем хромосомы обмениваются правыми частями, в результате чего получаются новые возможные решения оптимизационной задачи:

$$P_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}, P_2 = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\},$$

$$P_{1,2}^1 = \{x_1, x_2, z_3, \dots, z_n\}, P_{1,2}^2 = \{z_1, z_2, x_3, \dots, x_n\}.$$

Рассмотренный выше оператор скрещивания не является единственным. Существует огромное число операторов кроссинговера, так как их структура в основном и определяет эффективность генетических алгоритмов. Среди наиболее известных операторов скрещивания можно отметить следующие: двухточечный оператор кроссинговера [1], циклический оператор кроссинговера [1], упорядоченный оператор кроссинговера [1], триадный кроссинговер [9], перетасовочный кроссинговер [9] и др.

Следующим, наиболее часто применяемым генетическим оператором является оператор мутации. Оператор мутации необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствует защите от преж-

девременной сходимости. Простейший оператор мутации меняет местами два случайно выбранных в хромосоме гена:

$$P_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\},$$

$$Pm_3 = \{x_1, x_2, x_4, x_3\}.$$

Так же существуют и другие операторы мутации, например двухточечный оператор мутации [1].

Рассмотренные выше генетические операторы являются основными, но не единственными. К часто используемым генетическим операторам можно отнести: оператор инверсии [1], оператор транслокации [1], оператор транспозиции [1], оператор сегрегации [1] и многие другие. В настоящее время продолжают появляться новые генетические операторы.

В целом можно утверждать, что в каждом конкретном случае нужно внимательно подходить к выбору генетических операторов, используемых в ГА, так как это во многом влияет на качество и скорость получения конечного результата.

Как уже отмечалось выше, работа генетического алгоритма представляет собой повторяющийся процесс. Простейший (классический) алгоритм ГА [3] представлен на рис. 1.

В классическом ГА обычно используются два генетических оператора: кроссинговер и мутация. На первом этапе случайным образом создается популяция особей (возможных решений). Даже если все исходные особи будут иметь низкую приспособленность, в результате работы ГА должны появиться хромосомы, кодирующие более точные решения оптимизационной задачи.

Обычно для кодирования решений используется бинарный алфавит. При этом принято использовать специальный прием кодирования оптимизируемого параметра, принимающего действительные значения в некотором диапазоне $[a_i, b_i]$, в битовую строку. Интервал допустимых значений оптимизируемого параметра разбивают на участки с требуемой точностью. Для преобразования целочисленного значения хромосомы g_i из множества $\{0, \dots, 2^K\}$ в вещественное число r_i из интервала пользуются формулой:

$$r_i = g_i \cdot \frac{(b_i - a_i)}{2^K - 1} + a_i.$$

Чаще всего используется $K = 8; 16$.



Рисунок 1 – Основные этапы классического ГА

Бинарное кодирование обеспечивает лучший поиск с помощью гиперплоскостей, так как предоставляет максимальное их количество, при этом для встречаемости каждого символа в каждой позиции требуется меньший размер популяции. Следует отметить, что довольно часто ГА будет работать лучше при кодировании параметров кодом Грея [10], а не прямым бинарным кодом. Это связано с тем, что расстояние Хэмминга [10] между битовыми представлениями данных может и не отражать близость в привычном смысле – например, числа 7 и 8 различаются на 4 бита. Бинарное кодирование добавляет дополнительные разрывы, что осложняет поиск.

Однако в некоторых случаях более целесообразно применять вещественное кодирование (например, для 100 переменных, изменяющихся в интервале $[-500; 500]$, требуется найти минимум с точностью до шестого знака после запятой. В этом случае при использовании ГА с двоичным кодированием длина строки составит 3000 элементов, а пространство поиска – около 10^9 в степени 1000).

Начальный размер популяции так же может влиять на работу ГА. Большие и обладающие достаточным разнообразием представленных решений популяции дают генетическому алгоритму больший шанс скорее найти нужное решение, но вместе с тем требуют и больших вычислительных ресурсов при работе. В статье [11] подробно рассмотрен вопрос выбора размера начальной популяции, необходимой для стабильной работы ГА.

В рассматриваемом классическом ГА используется оператор кроссинговера. Существуют различные подходы к выбору особей для скрещивания. Простейший из них, когда родительские особи выбираются случайно (панмиксия). Однако обычно вероятность скрещивания лучших хромосом с худшими уменьшается на последних итерациях алгоритма. Это приводит к скрещиванию лучших хромосом между собой и закреплению желаемых признаков в хромосомах.

Часто используются и другие методы выбора пар хромосом для оператора кроссинговера. Например «близкое родство» (инбридинг), когда первая хромосома выбирается случайным образом, а вторая хромосома с большей вероятностью будет кодировать близкое решение. Так же к методам выбора особей для скрещивания можно отнести аутбридинг [9], выбор на основе кода Грея [9] и другие.

Одним из важнейших этапов ГА является этап отбора. На данном этапе выбираются особи, над которыми будут выполняться различные генетические операторы: скрещивание, мутация и т.д. Именно эти особи будут оказывать влияние на следующие поколения. В настоящее время известны различные стратегии отбора. Например, ранговый отбор, когда для каждой особи ее вероятность быть отобранной пропорциональна ее порядковому номеру в отсортированной по возрастанию приспособленности популяции. Довольно часто так же применяются турнирный отбор [9], элитный отбор [1], отбор на основе заданной шкалы [1] и др.

Рассмотренный выше классический ГА не является единственным. Существуют и другие модели ГА: *Genitor* [7], *Hybrid algorithm* [7], *CHC* [7] и т.д. В каждом конкретном случае нужно детально анализировать исходные

данные, перед выбором конкретной модели ГА. Иногда поисковые генетические алгоритмы используют совместно с классическими методами оптимизации. В таких случаях ГА позволяет приблизиться к искомым значениям, а классические методы оптимизации (метод градиентного спуска, метод покоординатного спуска и т.д.), в свою очередь, позволяют более точно их определить.

В последнее время с развитием технологий параллельных вычислений, стали появляться и широко использоваться параллельные генетические алгоритмы [1, 12]. ПГА позволяют гораздо эффективней использовать мощности современных вычислительных систем. Параллельные генетические алгоритмы условно делятся на два больших класса: «островов» и «мастер-рабочий» [12].

При использовании схемы «островов» происходит параллельное развитие нескольких независимых популяций. Через некоторое число поколений производится обмен лучшими особями. Корректная реализация генетического алгоритма класса «островов» является довольно сложной нетривиальной задачей.

В схеме «мастер-рабочий» расчет функции приспособленности каждой особи происходит параллельно, при этом реализуется один цикл развития популяций. Особенно выгодно использовать данную схему, если оценка особей вычисляется по сложным формулам.

Обычно эффективность работы различных моделей ГА принято оценивать количеством вычислений целевой функции [13]. Чем меньше потребовалось вычислений целевой функции, при поиске оптимума, тем лучше реализован ГА. Тестовые функции, на которых можно экспериментально оценить конкретную реализацию ГА, должны учитывать сильные стороны генетического алгоритма, то есть быть многоэкстремальными и многомерными. В качестве тестовых функций очень часто используют функции, предложенные одним из студентов Холланда Де Йонгом [9] (в литературе их очень часто называют *dejong1*, *dejong2*, *dejong3*, *dejong4*).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В настоящее время существует огромное количество различных моделей и модификаций генетического алгоритма. Сравнить экспериментально, на тестовых функциях, все их сильные и слабые стороны между собой, не представляется возможным в рамках одной статьи. Поэтому, было решено в разделе эксперименты рассмотреть положительный опыт реального применения ГА для оптимизации многоэкстремальной функции в методе BORF [14], а так же нетривиальную модификацию генетического алгоритма для вычислений с использованием графических процессоров.

Метод BORF относится к классу методов трассерной визуализации PIV [15], которые позволяют экспериментально определять поля скоростей в различных потоках жидкости и газа. Данный метод пытается строить синтетическое реконструированное изображение, имеющее минимальные отличия от цифрового изображения течения, полученного естественным путем. Мерой отличия служит функция ошибки E (принцип ее вычисления детально описан в работе [14]). Функция ошибки E может иметь большое число локальных минимумов. В таком случае, использование классических методов оп-

тимізації (таких як, наприклад, метод градієнтного спуску) може привести к тому, що ми знайдемо локальний, а не глобальний екстремум. Так же функція помилки залежить від більшого числа змінних (в деяких експериментах число параметрів функції E досягло 9000). Тому, одним із способів пошуку мінімуму функції відміння, застосовуваного в методі BORF, вважається використання генетических алгоритмів. Щоб оцінити цільовість використання ГА проводилися ряд експериментів на тестовому теченні, з різкими градієнтами швидкості, описуваному наступним чином:

$$V_x = A \tanh\left(\frac{y-100}{10}\right) + \frac{y}{450}, V_y = 0, V_z = 0. \quad (2)$$

Для розрахунку профілю швидкості тестового течення методом трасерної візуалізації в методі BORF по череді використовувалися метод градієнтного спуску і ГА.

Довольно часто використання ГА супроводжується великими часовими витратами, особливо в тих випадках, коли розрахунок цільової функції потребує великих обчислювальних навантажень. В цьому випадку грамотне застосування паралельних обчислень може значно збільшити швидкість розрахунку. В роботі [13] автор провів експеримент, де порівняв час роботи класического ГА і ПГА працюючого по схемі «мастер-робітник». Генетический пошук використовувався для оптимізації функції відміння в методі BORF. При цьому ПГА працював на графічних процесорах і використовував для цього технологію Cuda. Основною перевагою використання графічних адаптерів для паралельних обчислень вважається те, що аналогічні за продуктивністю кластери або багатоядерні процесори мають в сотні разів більшу ціну. Для того, щоб проаналізувати ефективність роботи ПГА на графічних процесорах, порівнювалося час роботи генетического пошуку в методі BORF з використанням паралельних технологій і без використання.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 2. представлені теоретический профіль течення (2), а так же профілі швидкості, отримані методом BORF з використанням або ГА з бінарним кодуванням рішень, або методу градієнтного спуску.

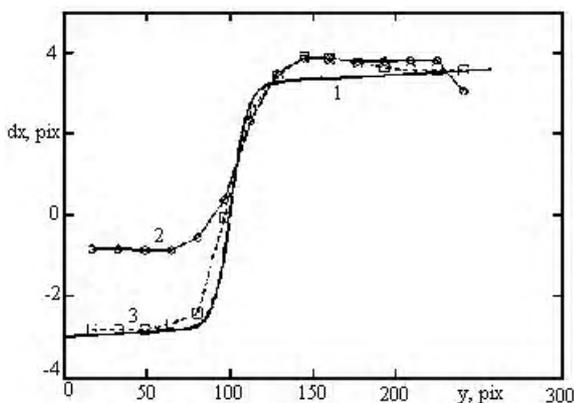


Рисунок 2 – Профілі швидкості досліджуваного течення: 1 – теоретический профіль; 2 – профіль швидкості, побудований на основі даних, отриманих методом BORF з використанням методу градієнтного спуску; 3 – профіль швидкості, побудований на основі даних, отриманих методом BORF з використанням генетических алгоритмів

Як видно з рис. 2, використання методу градієнтного спуску в методі BORF дає менше точні результати, ніж апарат генетических алгоритмів. Це можна пояснити тим, що функція E має велике число локальних мінімумів, і метод градієнтного спуску знаходить один з таких і зупиняє свою роботу.

На рис. 3 представлений графік залежності часу роботи різних версій ГА від числа поколінь (число особей в кожному поколінні – 100).

Із графіка (рис. 3) видно, що використання технології CUDA при пошуку мінімуму функції відміння генетическим алгоритмом дозволяє на порядки знизити час розрахунку. При цьому, слід зауважити, що з збільшенням числа поколінь час ГА, що використовує паралельні обчислення, зростає помітно повільніше, ніж час розрахунку генетического алгоритму, що не використовує паралельні обчислення.

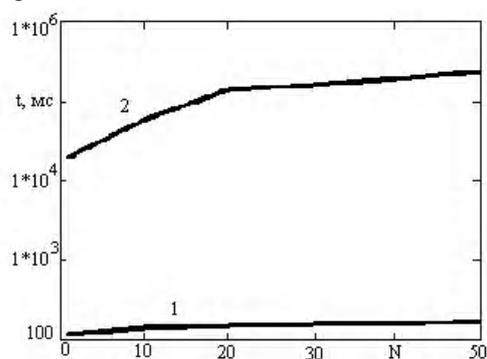


Рисунок 3 – Залежність часу роботи t від числа поколінь N ГА в задачі пошуку мінімуму функції відміння: 1 – з використанням паралельних обчислень на графічному адаптері; 2 – без використання паралельних обчислень

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время ГА нашли очень широкое практическое применение абсолютно в разных отраслях науки. Генетические алгоритмы сейчас успешно используются при решении следующих проблем: оптимізація функцій, різноманітні задачі на графах (задача комівояжера, раскраска и т. д.), настройка и обучение искусственной нейронной сети, задачи компоновки, задачи составления расписаний, аппроксимация функций, некоторые задачи в области биоинформатики.

Однако, не следует использовать ГА в случае, когда необходимо найти точный глобальный оптимум. ГА не гарантирует обнаружения глобального решения за приемлемое время. ГА не гарантируют и того, что найденное решение будет оптимальным решением. Тем не менее, генетические алгоритмы применимы для поиска «достаточно хорошего» решения задачи за «достаточно короткое время».

ВЫВОДЫ

В работе проанализированы основные принципы функционирования поисковых генетических алгоритмов, представлены наиболее важные генетические операторы, модели и стратегии, применяемые в ГА. Так же рассмотрен положительный опыт практического применения ГА для оптимізації многоэкстремальных функций.

Новизна выполненного обзорного исследования состоит в комплексном подходе к анализу эффективности решения многопараметрических оптимизационных задач с использованием генетических алгоритмов, который включает характеристику операторов, моделей, методов и стратегий, используемых в ГА. Впервые показано, что классический генетический алгоритм с бинарным кодированием допускает эффективную компьютерную реализацию, учитывающую особенности архитектуры графических процессоров при их использовании в высокопроизводительных параллельных вычислениях.

Практическая значимость результатов работы заключается в систематизации, которая позволяет оценивать эффективность применения генетических алгоритмов при решении конкретных прикладных задач. Определен также доступный и экономичный способ значительного повышения производительности расчетов с использованием генетических алгоритмов на основе программно-аппаратной технологии CUDA, обеспечивающей реализацию параллельных вычислений на графических процессорах.

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований являются распределенные генетические алгоритмы, способные эффективно выполняться параллельно на вычислительных устройствах различной архитектуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы кафедры информационных технологий Киевской академии водного транспорта «Моделирование сложных объектов и процессов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
2. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

3. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence* / J. H. Holland. – Cambridge : A Bradford Book, 1992. – 211 p.
4. Goldberg D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning* / D. Goldberg. – Boston : Addison-Wesley Professional, 1989. – 432 p.
5. Скобцов Ю. А. Основы эволюционных вычислений / Ю. А. Скобцов. – Донецк : ДонНТУ, 2008. – 326 с.
6. *Soft computing: new trends and application* / [L. Fortuna, G. Rizzotto, M. Lavorgna, G. Nunnari and other]. – Heidelberg : Springer, 2001. – 267 p.
7. Whitley D. A genetic algorithm tutorial / D. Whitley // *Statistics and Computing*. – 1994. – Vol. 4. – P. 65–85. DOI: 10.1007/BF00175354.
8. Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора / Ч. Дарвин. – СПб. : Наука, 2001. – 568 с.
9. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. – Астрахань : Астраханский университет, 2007. – 87 с.
10. Хэмминг Р. В. Теория кодирования и теория информации / Р. В. Хэмминг. – М. : Радио и связь, 1983. – 176 с.
11. Выбор размера популяции для генетического алгоритма [Электронный документ]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/114910/>. – 25.12.2014 г. – Загл. с экрана.
12. Иванов Д. Е. Масштабируемый параллельный генетический алгоритм построения идентифицирующих последовательностей для современных многоядерных вычислительных систем / Д. Е. Иванов // *Управляющие системы и машины*. – Киев, 2011. – № 1. – С. 25–32.
13. Мочалин А. Е. Использование параллельных генетических алгоритмов в методе обработки трассерных изображений BORF / А. Е. Мочалин // *Вісник черкаського університету*. – Черкаси, 2013. – № 38(291). – С. 58–64.
14. Мочалин А. Е. Информационная технология обработки цифровых трассерных изображений на основе построения реконструированного кадра: дис. канд. техн. наук. 05.13.06. – Алчевск, 2013. – 177 с.
15. Adrian R. J. Twenty years of particle image velocimetry / R. J. Adrian // *Exp. in Fluids*. – 2005. – Vol. 39, No. 2. – P. 159–169. DOI: 10.1007/s00348-005-0991-7.

Статья поступила в редакцию 13.01.2015.

После доработки 23.02.2015.

Мочалин О. Є.

Канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОЕКСТРЕМАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ ВЕЛОКОЇ КІЛЬКОСТІ ПАРАМЕТРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Формально сформульована задача оптимізації. Розглянуті основні переваги і недоліки класичних методів оптимізації. Висвітлені основні передумови появи та історія розвитку апарату генетичних алгоритмів. Проаналізовано сучасний стан бібліографії, присвяченої питанням використання пошукових генетичних алгоритмів. Розглянуто основні ідеї та принципи, що лежать в основі роботи генетичних алгоритмів. Виконано огляд найбільш поширених генетичних операторів: кросингверу і мутації. Детально проаналізовані базові етапи роботи класичного генетичного алгоритму. Розглянуті основні способи кодування рішень в хромосомах, вибору пар особин для схрещування, а так само представлені деякі поширені стратегії відбору. Сформульовані основні переваги бінарного кодування рішень в хромосомах із застосуванням коду Грея, а так само дані рекомендації з використання дійсного кодування рішень в різних ситуаціях. Описані два основних класи паралельних генетичних алгоритмів: «острівів» і «майстер-робітник». Наведено приклад використання генетичного алгоритму для оптимізації багатоекстремальної функції, що залежить від великої кількості параметрів. Представлені експериментальні дані, що підтверджують переваги використання графічних процесорів для обчислень в паралельних генетичних алгоритмах. Викладені рекомендації щодо доцільності застосування генетичних алгоритмів у різних ситуаціях.

Ключові слова: оптимізація, генетичний алгоритм, м'які обчислення, генетичні оператори, кодування рішень.

Mochalin O. Ye.

PhD, Associate professor of department of information technology, Kyiv State Maritime Academy named after hetman Petro Konashevich-Sahaydachniy, Kyiv, Ukraine

GENETIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF MULTIEXTREMUM FUNCTIONS WITH LARGE PARAMETERS NUMBER

An optimization problem is formally formulated. The main advantages and disadvantages of classical optimization methods are considered for this problem. Basic prerequisites for the emergence and history development of the instrument of genetic algorithms are highlighted. The current state of the bibliography which is dedicated to the use of search genetic algorithms is analyzed. The basic ideas and underlying principles

of genetic algorithms functioning are considered. A review of the most commonly used genetic operators: crossover and mutation, is made. The basic steps of classical genetic algorithm operation are analyzed in detail. The coding problem of solutions in the chromosomes and the selection of individual pairs for crossbreeding are considered. Some common selection strategies are presented as well. The basic benefits of the binary coding of solutions in the chromosomes that using Gray code are formulated. The recommendations are also given on the using of solutions real coding in different situations. The two main classes of parallel genetic algorithms: «islands» and «master – slave», are described. The example of using a genetic algorithm to optimize multiextremal function depending on a large number of parameters is showed. Experimental data are presented which confirm the benefits of graphic processors using in parallel implementation of genetic algorithm. The expediency recommendations of the use of genetic algorithms in different situations are set out.

Keywords: optimization, genetic algorithm, Soft Computing, genetic operators, coding of solutions.

REFERENCES

1. Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. *Geneticheskie algoritmy*. Moscow, FIZMATLIT, 2006, 320 p.
2. Kalitkin N. N. *Chislennye metody*. Moscow, Nauka, 1978, 512 p.
3. Holland J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Cambridge, A Bradford Book, 1992, 211 p.
4. Goldberg D. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston, Addison-Wesley Professional, 1989, 432 p.
5. Skobcov Ju. A. *Osnovy jevoljucionnyh vychislenij*. Doneck: DonNTU, 2008, 326 p.
6. Fortuna L., Rizzotto G., Lavorgna M., Nunnari G., Xibilia M. G., Caponetto R. *Soft computing: new trends and application*. Heidelberg, Springer, 2001, 267 p.
7. Whitley D. A genetic algorithm tutorial, *Statistics and Computing*, 1994, Vol. 4, pp. 65–85. DOI: 10.1007/BF00175354.
8. Darwin Ch. *Proishozhdenie vidov putem estestvennogo otbora*. Sankt-Peterburg, Nauka, 2001, 568 p.
9. Panchenko T. V. *Geneticheskie algoritmy*. Astrahan', Astrahanskij universitet, 2007, 87 p.
10. Hjemming R. V. *Teoriya kodirovanija i teoriya informacii*. Moscow, Radio i svjaz', 1983, 176 p.
11. *Vybor razmera populjaccii dlja geneticheskogo algoritma* [Elektronnyj dokument]. Rezhim dostupa: <http://habrahabr.ru/post/114910/>. 25.12.2014 g. Zagl. s jekrana.
12. Ivanov D. E. *Masshtabiruemyj paralel'nyj geneticheskij algoritm postroenija identifikirujushhh posledovatel'nostej dlja sovremennyh mnogojadernyh vychislitel'nyh sistem, Upravljajushhie sistemy i mashiny*. Kiev, 2011, No. 1, pp. 25–32.
13. Mochalin A. E. *Ispol'zovanie paralel'nyh geneticheskikh algoritmov v metode obrabotke trassernyh izobrazhenij BORG*, *Visnik cherkas'kogo universitetu*. Cherkasi, 2013, No. 38(291), pp. 58–64.
14. Mochalin A. E. *Informacionnaja tehnologija obrabotki cifrovych trassernyh izobrazhenij na osnove postroenija rekonstruirovannogo kadra*: dis. kand. tehn. nauk. 05.13.06. Alchevsk, 2013, 177 p.
15. Adrian R. J. *Twenty years of particle image velocimetry*, *Exp. in Fluids*, 2005, Vol. 39, No. 2, pp. 159–169. DOI: 10.1007/s00348-005-0991-7.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

UDC 004.93

Amanatidis Dimitrios¹, Dossis Michael², Androulidakis Iosif³¹PhD, Adjunct Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Technological Educational Institute of Western Macedonia, Kastoria, Greece²PhD, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Technological Educational Institute of Western Macedonia, Kastoria, Greece³PhD, Network Operation Centre, University of Ioannina, Ioannina, Greece

IMAGE CONTOUR SEGMENTATION IN HARDWARE

The use of Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation method is considered. The segmentation method chosen, is a well-known, state-of-the-art, robust, efficient and fast-converging one, that combines functionals depending on the curve geometry and image properties in a level-set framework. The cost function sought to be minimized, is formulated as a weighted sum of three integral measures; a robust alignment term that leads the evolving surface to the edges of the desired object, a minimal variance term that measures the homogeneity inside and outside the object, and a geodesic active surface term that is used mainly for regularization. The algorithm is initially implemented in MatLab and ADA and subsequently, it is ported to our Behavioural Synthesis tool, the CCC HLS framework, which is capable of delivering correct-by-construction RTL VHDL implementations of computation-intensive applications. This way, behavioural ADA specifications are transformed into RTL micro-architectures which then can be easily implemented by commercial RTL synthesizers.

Keywords: Image Contour Segmentation, High Level Synthesis, Custom Coprocessors Compilation, FPGA Implementation.

NOMENCLATURE

CCC Custom Coprocessors Compilation;
HLS High Level Synthesis;
RTL Register Transfer Level;
ITF Intermediate Tables Format;
PARCS Parallel Abstract Resource – Constrained Scheduling.

INTRODUCTION

Lately, there has been a substantial progress in partial differential equations and variational approaches in various colour image processing tasks. Among the associated computer vision application, one may typically find on one hand; applications aiming to remodel (in the PDE/Variational framework) more traditional tasks or on the other hand some emerging applications [1]:

– Image restoration, which is historically considered to be one of the oldest aims. Moreover, improving the quality of the image is quite frequently, one of the first, necessary preprocessing steps taken.

– Image segmentation, one of the most important steps in image analysis, with its own well established theoretical objectives and methodologies.

– Image and video inpainting, used for restoration of photograph cracks or errors due to image transmission and image compression and coding applications.

– Image decomposition, into a sum of a geometric part and an oscillating patterns (texture) part, used mainly in image compression.

– Image classification, where variational models are introduced in the place of more well-studied approaches such as region growing and stochastic (mainly Markov Random Field) based ones.

Accurate segmentation of various types of imagery, is a well-studied, non-trivial, image and application dependent task, which is however an essential step towards higher level image understanding. It combines the early vision preprocessing stages where salient features are highlighted while others suppressed, and allows us to move to a more effective scene analysis stage. Applications of image segmentation can be found in a broad range of disciplines; from medical diagnostic applications and inspection of manufactured products to military, security and automotive industry applications; traffic control systems and video surveillance to face, fingerprint and iris recognition to name a few.

Generally speaking, image segmentation techniques can be either region-based or edge-based, which take into consideration the basic concepts of similarity and discontinuity respectively. In many cases, segmentation is formulated as an optimization problem where a set of unknown parameters have to be estimated. With the level-set approach the problem is posed as that of tracking a moving interface. Curve and surface evolution can be computed without having to parameterize the objects (Eulerian rather than Lagrangian approach) which can undergo complex topological deformations such as merging, splitting and developing holes.

The aim of this work is to present the implementation of a computationally demanding, image contour segmentation algorithm in hardware. In essence, the algorithm has to be discretized so that it can be efficiently ported to our CCC HLS framework and thereby serve as a paradigm for future implementations. Section I gives a brief problem statement.

Section II reviews related work. Section III outlines the theory of geometric active contours and Section IV presents the experimental results. Section V stresses the relation of verification and synthesis flows for our experiments and the last section discusses and concludes our work.

1 PROBLEM STATEMENT

The method's input data as discussed also in later sections are: the grayscale image I , the initial contour φ_{initial} , the three weighting coefficients (w_1, w_2, w_3) for the respective contributing terms in the optimization scheme, the time step τ , and the loop termination criteria; δ for convergence and $iter$ for the maximum number of iterations. The method's output is the final contour, φ_{final} .

2 LITERATURE REVIEW

The desired properties of a good image segmentation method, as defined in [2], are that it produces homogeneous, in a sense, regions, with a simple hole-less interior, clearly distinct from their adjacent regions, having accurate and simple borders. There are mainly two broad segmentation strategies which can be seen as being one the «dual» of the other: The first one mainly exploits the notion of homogeneity in regions, separated by sharp boundaries, to identify meaningful objects. A well-known representative method of the first approach is the seminal work by Mumford and Shah [3]. In this paper, we concentrate on the second approach which aims to segment an image by detecting the contours of the different image objects. This is actually an edge detection method, with the main principle of matching deformable curves to the contour objects by means of a suitable energy functional minimization. As examined below, various improvements have been suggested over the years to the original model leading to geodesic active contours and the level sets method.

Usually, edge detection requires differentiation to detect gray-level changes and smoothing, for noise reduction of the image. The most common method of (first-order) differentiation is the gradient, while on the other hand, smoothing typically involves filtering with a 2D Gaussian.

Quite frequently, the combined smoothing and differentiation of the image is implemented by filtering the image with the differentiated smoothing filter, as in [4] for example, where edges are defined as the zero crossing curves of the Laplacian of Gaussian (LoG) applied to the image.

Active contour models, (or deformable models) which are defined as energy-minimizing splines, with energy local minima corresponding to the desired image characteristics, started with the classical snakes [5], followed by non-variational geometric active contours [6–7] and geodesic active contours [8].

3 GEOMETRIC ACTIVE CONTOURS

In two dimensions, a simple curve defines the object boundaries. A given initial curve can evolve according to its geometry and the information in the image. The evolution is a result of minimizing an energy functional – a cost function – which is influenced by image information along the curve and the intrinsic geometry of the curve. Minimization of such a measure leads to a curve that should coincide with the boundary of the object. The first variation of the functional is used to evolve a given curve toward a significant local minimum of the functional, by applying a gradient descent flow.

A more recent method [9], examined geometric functionals that do not depend on the internal parameterization of the curve, but rather on its geometry and the image properties (geometric active contours). A weighted sum of three integral measures is used, a robust alignment term that leads the evolving surface to the edges of the desired object, a minimal variance term that measures the homogeneity inside and outside the object, and a geodesic active surface term that is used mainly for regularization. The method has also been used for segmentation of thin structures in volumetric medical images [10], where the respective weights were modified for different types of images (brain CTA, lung CT, MRI etc.).

The first functional considered is the Robust Alignment Term:

$$E_{AR}(C) = \int_0^L \left| \langle \nabla I(x(s), y(s)) n(s) \rangle \right| ds, \quad (1)$$

where the inner product gets high values if the curve normal n aligns with the image gradient direction, therefore we seek to maximize it.

The second functional is based on the Robust Minimal Variance criterion (proposed in [11]) which is given by:

$$E_{RMV}(C) = \iint_{\Omega_c} |I(x, y) - c_1| dx dy + \iint_{\Omega/\Omega_c} |I(x, y) - c_2| dx dy, \quad (2)$$

where c_1 and c_2 are the mean intensities inside and outside the contour respectively and in the optimal case we look for the best separating contour. The term is of high importance in noisy images.

Finally, the Geodesic Active Contour functional which is sought to be minimized (as it is an inverse edge indicator) is given by:

$$E_{GAC}(C) = \int_0^L g(C(s)) ds. \quad (3)$$

This regularization term can be particularly useful in order to control the other two contributing terms (robust alignment and minimal variance).

Now, computing the first variations for each of the previous functionals, the optimization problem is posed as:

$$\operatorname{argmax}_{C, c_1, c_2} E(C, c_1, c_2), \quad (4)$$

where the combined functional is given below and α, β are positive weighting constants, chosen empirically depending

on the image, with α usually much smaller than β . A suggested rule of thumb for determining the best coefficients is that, when the image has a large amount of noise, β should be large, else it should be small. Moreover, when the variance of gray scales inside the object is large, should be small:

$$E(C, c_1, c_2) = E_{AR}(C, c_1, c_2) - \alpha E_{GAC}(C) - \beta E_{MV}(C), \quad (5)$$

which has the following Osher-Sethian [12] level-set formulation:

$$\varphi_t = \begin{cases} \text{sign}(\langle \nabla \varphi, \nabla I \rangle) \Delta I + \alpha \text{div}(g(x, y) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|}) + \\ \beta (c_2 - c_1) \left(I - \frac{c_1 + c_2}{2} \right) \end{cases} |\nabla \varphi|. \quad (6)$$

The above formulation is shown in [9] to be solved numerically using a locally one-dimensional, fully implicit scheme:

$$\varphi^{n+1} = \prod_{k=1}^2 (\mathbf{I} - \tau \alpha A_k)^{-1} (\varphi^n + \tau \eta(\varphi^n, \nabla I)), \quad (7)$$

where \mathbf{I} is the identity matrix and the elements of the operators A_1 and A_2 are (η is the distance between neighbouring pixels):

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} \frac{g_i + g_j}{2h^2}, & \text{if } j \in N(i); \\ -\sum_{k \in N(i)} \frac{g_i + g_j}{2h^2}, & \text{if } j = i; \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (8)$$

and the function η is:

$$\eta(\varphi, \nabla I) = \text{sign}(\langle \nabla \varphi, \nabla I \rangle) \Delta I + \beta (c_2 - c_1) \left(I - \frac{c_1 + c_2}{2} \right). \quad (9)$$

4 EXPERIMENTS

In this work, we expand on results that were reported earlier in [13]. This contour-based method, has been shown to be quite accurate and fast converging, in fact in all of the images that we have experimented with, a total number of 10 iterations is sufficient for convergence, i.e. increasing the number of iterations has no effect on the final segmented mask. Fig. 1 depicts the contours for each one of the first nine iterations, superimposed on the original image («mri»).

Specifically, in this section we present our experimental results and the qualitative comparison of the three implemented algorithms; the original MatLab version, a «flat» version of the original method in MatLab again and the GNU ADA «flat» version which is the input to our CCC HLS tools (Fig. 2).

In building up our framework towards an efficient hardware representation of the method, we re-implemented the algorithm in MatLab (constructing a «flat» version of the original method, i.e. with no function calls, for hardware implementation efficiency), using 32-bit wide integers only (to avoid overflowing), leaving all MatLab parallel constructs out (and merging loops where applicable),

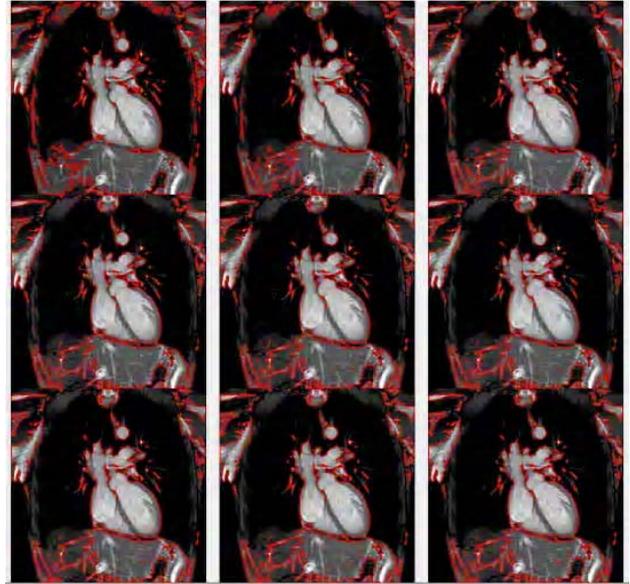


Figure 1 – Contours for the first nine iterations

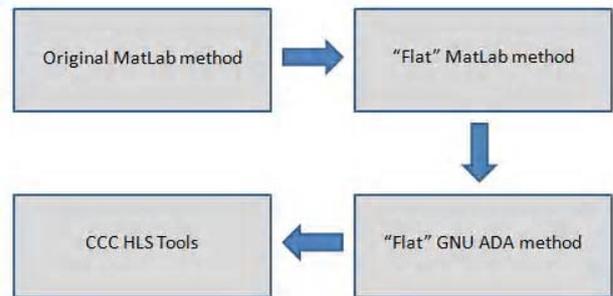


Figure 2 – The experimental framework

approximating square roots with the shifting n -th root algorithm and scaling ($\times 100$) some constants to avoid using any floats. Additionally, the time step τ was set to 1 rather than 0.5 and the well-studied example of $G(x, y) = 1$ was used as the inverse edge indicator. This led to a great amount of simplifications in computation, essential if the algorithm is to be implemented in hardware. The results were compared with the results obtained by the original method and were found of equivalent quality.

Fig. 3 depicts results for the «football» image with the original MatLab method. Simpler case images, such as those with no noise, uniform background and no illumination have been considered as well (as in [13]) but the main sequence tested extensively has been «football», a rather challenging one. The final contour is superimposed on the input image frame and the originally suggested parameters were left intact:

- $w_1 = 0.01$ (weight for the geodesic active contour term);
- $w_2 = 4.0$ (weight for the alignment forces term);
- $w_3 = 5.0$ (weight for the minimal variance term);
- $\tau = 0.5$ (the time step);
- $iter = 30$ (maximum number of iterations);
- $delta = 0.0001$ (the convergence criterion threshold).

A segmented mask can be constructed by means of the final contour array elements' signs image. Note that no optimization on the contributing terms' weights has been exercised in this example.



Figure 3 – Original MatLab method results



Figure 4 – «Flat» method MatLab results

Fig. 4 displays the results with the «flat» version of the original method in MatLab with the final contour appearing in red and parameter values set to: $w1=1$, $w2=400$, $w3=500$, $\tau = 1$, $iter=10$ and $delta=1$.

The method reads the required grayscale or binary images (initial contour and input images) and any required weights and constants. Images are read and written in *.ppm* format (portable pixel maps), which makes colour image processing also feasible. An outline of the algorithm steps is following:

- read input image (I) and initial contour (Φ) arrays;
- initialize some essential parameters, namely the three functional weights and the maximum number of iterations and the convergence threshold which are used as possible termination criteria;
- pre-compute first and second order derivative arrays;
- start the main while loop which tests for either convergence (using the $L2$ norm) or exceeding the maximum number of iterations – on each loop iteration do:
 - a) set the previous contour to be the current contour;
 - b) compute the minimal variance term (Fig. 5);
 - c) compute the robust alignment term using the derivative images (Fig. 6);
 - d) compute the new contour array by combining the three functional terms (Fig. 6);
 - e) implement the main numerical formulation scheme (previous implicit function) which utilizes Thomas algorithm (simplified significantly with the previous assumptions) for inverting the tri-diagonal operators $A1$ and $A2$;
 - f) set ϕ as a distance map of its zero set (previous redistance function) and compute the new contour array using fast-marching (previous update function);
 - g) check for convergence and increment iteration counter;
- end the main while loop.

Subsequently, the algorithm was implemented in GNU ADA and a comparison of the results showed equivalence in quality once more (Fig. 6). At this stage, we had to deal with some additional incompatibilities with respect to integer arithmetic, as MatLab rounds towards positive and negative infinities, whereas GNU ADA (GNAT Programming Studio) truncates towards zero.

```

--and compute Threshold (LLoydMax)
-----
for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    oldCout(i)(j) := Cout(i)(j);
    temp1 := Cout(i)(j);
    if temp1 < 0 then A1(i)(j) := 1; --create A1 := mask_in
    else A1(i)(j) := 0;
    end if;
    A2(i)(j) := 1 - A1(i)(j); --create A2 := mask_out
  end loop;
end loop;
temp1 := 0; --to create mask_in (A1) sum
temp2 := 0; --to create mask_out (A2) sum
temp3 := 0; --to create mask_in*I sum
temp4 := 0; --to create mask_out*I sum
for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp1 := temp1 + A1(i)(j);
    temp2 := temp2 + A2(i)(j);
    temp := A1(i)(j) * Iin(i)(j);
    temp3 := temp3 + temp;
    temp := A2(i)(j) * Iin(i)(j);
    temp4 := temp4 + temp;
  end loop;
end loop;
temp1 := temp3 / temp1; --this is I_in
temp2 := temp4 / temp2; --this is I_out
temp3 := (temp1 + temp2) / 2; --this is c1
temp4 := temp2 - temp1; --this is c2
for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp1 := Iin(i)(j) - temp3;
    Threshold(i)(j) := temp4 + temp1; --force:=temp4.*(I-temp3)
  end loop;
end loop;
    
```

Figure 5 – Computing minimal variance term

5 RESULTS

As stated, the designs were verified rapidly at the MatLab and compiled ADA code level. Moreover, RTL-level simulations were executed to prove the argument of the correctness at the level of the automatically generated RTL VHDL implementations, by the CCC behavioural synthesis tools. Thus, we ported the code to our tool, the CCC HLS framework in order to deliver correct-by-construction, Register Transfer Level (RTL), VHDL implementations of this computation-intensive application. The CCC framework consists of the frontend and the backend compiler, which communicate with each other via the ITF database.

The frontend compiler was built using compiler-compiler techniques and the backend compiler using logic

```

end loop;
temp := CoutT(WIDTH) (j) -- CoutT(W_1) (j) :
T2(j) (WIDTH) := temp / 2;
end loop;
-----
--compute Alignment (Laplacian term)
--use computed P,Q,D2I here
-----
for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp1 := P(i) (j) * T1(i) (j);
    temp2 := Q(i) (j) * T2(i) (j);
    temp3 := temp1 + temp2;
    if temp3 > 0 then A1(i) (j) := -1; else
      if temp3 < 0 then A1(i) (j) := 1; else
        A1(i) (j) := 0;
      end if;
    end if;
    Alignment(i) (j) := A1(i) (j) * D2I(i) (j);
  end loop;
end loop;
-----
--compute new Phi (G and k are 1)
-----
for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp2 := Align * Alignment(i) (j);
    temp3 := Max_Lloyd * Threshold(i) (j);
    temp4 := Balloon + temp2 + temp3 + Cout(i) (j);
    Cout(i) (j) := temp4;
  end loop;
end loop;

```

Figure 6 – Final mask for GNU ADA method

programming techniques [14]. Moreover the ITF syntax and semantics are formally defined in [15]. Both of these methodologies are already patented with international patents [16]. The CCC synthesis flow is programmer-friendly, rapid and formal, which guarantees the correctness of the generated RTL implementation. Moreover, there are a number of custom options that can be used to drive the CCC compiler with specific environmental and other parameters.

The backend synthesis is optimized with the PARCS scheduler. PARCS is a formal optimizer which attempts to parallelize as many operations in the same clock cycle as possible, as long as control/data dependencies and resource constraints are obeyed.

This framework leads to behavioural ADA specifications being transformed into RTL micro-architectures, which can subsequently be implemented easily by commercial RTL synthesizers. RTL-level simulations were carried out to verify rapidly our designs and prove for correctness at the level of the automatically generated RTL VHDL implementations. Detailed experimentation with different images, validates the robustness of the proposed framework.

In order to verify the correctness of the translation a commercial tool from Mentor Graphics, Modelsim, was used to create and execute the required testbench. Test vectors (initial contour and input images) were created and fed into the algorithm (Model Under Test or MUT) in both the MatLab and the ADA environment. The actual output was finally compared to the desired one (Golden Model) to indicate a pass or fail outcome automatically.

CONCLUSION

The benefits of the proposed framework are significant. The method that was considered can efficiently detect object contours by considering the weighted sum of three

functionals; robust alignment functional, motivated by the fact that in many cases the gradient direction is a good estimator of the contour orientation; minimal variance functional, which seeks the best interior-exterior separation based on mean intensity values; geodesic active contour functional, a regularization term for other dominant terms. The first variations of the three functionals are extracted, formulated in a level-set framework and solved numerically. Even though the whole process may seem quite complicated and demanding at first sight, its FPGA implementation proved feasible.

In our effort to port high level ADA coding to RTL hardware, the use of our CCC tools proved invaluable; behavioural synthesis was automatic, very fast and correct-by-construction. Future work in this area includes experimentation with other computer vision algorithms such as optical flow and graph cuts, various neural network structures, e.g. PCNN (Pulse-Coupled Neural Networks) and RBFN (Radial Basis Function Networks), or other machine learning algorithms.

REFERENCES

1. Aubert G. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations / G. Aubert and P. Kornprobst // Applied Mathematical Sciences. – Springer Science and Business Media, LLC, 2nd ed. – 2006. –Vol. 147.
2. Haralic R. Computer and Robot Vision / R. Haralic and L. Shapiro, Eds. – 1993, chapter 16, Addison-Wesley.
3. Mumford D. Boundary detection by minimizing functionals / D. Mumford, J. Shah // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – San Francisco, CA, June 1985. – P. 22–26.
4. Marr D. Theory of edge detection / D. Marr, E. Hildreth // Proc of the Royal Society. – London B, 207. –1980. – P. 187–217.
5. Kass M. Snakes: Active contour models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // Int. Journal of Computer Vision. – 1988. – Vol. 1. – P. 321–331.
6. Malladi R. Shape modeling with front propagation: A level set approach // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1995. – vol. 17. – P. 158 –175.
7. Caselles V. A geometric model for active contours in image processing / V. Caselles, F. Catta, T. Coll, F. Dibos // Numer. Math. – 1993. – Vol. 66. – P. 1–31.
8. Caselles V. On geodesic active contours / V. Caselles, R. Kimmel and G. Sapiro // Int. Journal of Computer Vision. – 1997. – Vol. 22, No. 1. – P. 61–79.
9. Kimmel R. Fast edge integration // Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics / R. Kimmel, S. Osher and N. Paragios, Eds. – New York : Springer-Verlag, 2003.
10. Segmentation of Thin Structures in Volumetric Medical Images / M. Holtzman-Gazit, R. Kimmel, N. Peled and D. Goldsher // IEEE Transactions On Image Processing. – 2006. –Vol. 15, No. 2.
11. Chan T. Active Contours Without Edges / T. Chan and L. Vese / IEEE Transactions on Image Processing. – 2001. – Vol. 10, No. 2. – P. 266–277.
12. Osher S. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations / S. Osher, J. A. Sethian // Journal of Computational Physics. – 1988. – Vol. 79 – P. 12–49.
13. Dossis M. Using Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation algorithm / M. Dossis, D. Amanatidis, I. Androulidakis // Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). – Zilina, Slovakia, July 7–9, 2015.

14. Dossis M. A Formal Design Framework to Generate Coprocessors with Implementation Options / M. F. Dossis // *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*. – Science Academy Publisher, United Kingdom. – August 2011. – Vol. 2, No 4. – P. 929–936. ISSN: 2079–2557, www.sciacademypublisher.com.
15. Dossis M. Intermediate Predicate Format for Design Automation Tools / M. Dossis // *Journal of Next Generation Information Technology (JNIT)*. – May 2010. – Vol. 1, No. 1. – P. 100–117.
16. Dossis M. Patent № 1005308, 5/10/2006 / M. Dossis // By the Greek Industrial Property Organisation, 2006.

Article was submitted 09.08.2015.
After revision 16.05.2015.

Аманатідіс Дімітріос¹, Доссіс Михаїл², Андрулідакіс Йосиф³

¹Доктор філософії, ад'юнкт, асистент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічної освіти Західної Македонії, Касторія, Греція

²Доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічної освіти Західної Македонії, Касторія, Греція

³Доктор філософії, Центр управління комп'ютерними мережами, Університет Яніни, Яніна, Греція

АППАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНТУРНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуто використання поведінкового синтезу для створення апаратного забезпечення контурної сегментації зображень. В якості методу сегментації обраний добре відомий, надійний, ефективний метод, що швидко збігається, який комбінує функціонали, залежні від геометрії кривих і властивостей зображення у множині рівнів структури. Мінімізована функція витрат формулюється як зважена сума трьох інтегральних мір: стійкого вирівнювання (прагне розвинути поверхню до країв бажаного об'єкта), мінімальної дисперсії (вимірює однорідність всередині і зовні об'єкта) і геодезично активної поверхні (використовується в основному для регуляризації). Алгоритм спочатку реалізований в Matlab і ADA, а потім, він перенесений у наш інструмент Поведінкового синтезу – середовище ССС HLS, яке здатне створювати правильно побудовані RTL VHDL реалізації додатків, що інтенсивно використовують обчислення. Таким чином, поведінкові характеристики ADA перетворюються у мікроархітектури RTL, які потім можуть бути легко реалізовані за допомогою комерційних RTL синтезаторів.

Ключові слова: контурна сегментація зображень, високорівневий синтез, збірка користувальницьких сопроцесорів, ПЛИС-реалізація.

Аманатидис Димитриос¹, Доссис Михаил², Андрулидакис Иосиф³

¹Доктор философии, адъюнкт, ассистент кафедры компьютерной инженерии, Институт технологического образования Западной Македонии, Кастория, Греция

²Доктор философии, доцент кафедры компьютерной инженерии, Институт технологического образования Западной Македонии, Кастория, Греция

³Доктор философии, Центр управления компьютерными сетями, Университет Янины, Янина, Греция

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрено использование поведенческого синтеза для создания аппаратного обеспечения контурной сегментации изображений. В качестве метода сегментации выбран хорошо известный, надежный, эффективный и быстро сходящийся метод, комбинирующий функционалы, зависящие от геометрии кривых и свойств изображения во множестве уровней структуры. Минимизируемая функция затрат формулируется как взвешенная сумма трех интегральных мер: устойчивого выравнивания (стремится развить поверхность к краям желаемого объекта), минимальной дисперсии (измеряет однородность внутри и снаружи объекта) и геодезически активной поверхности (используется в основном для регуляризации). Алгоритм изначально реализован в MatLab и ADA, а затем, он перенесен в наш инструмент Поведенческого синтеза – среду ССС HLS, которая способна создавать правильно построенные RTL VHDL реализации приложений, интенсивно использующих вычисления. Таким образом, поведенческие характеристики ADA преобразуются в микроархитектуры RTL, которые затем могут быть легко реализованы с помощью коммерческих RTL синтезаторов.

Ключевые слова: контурная сегментация изображений, высокоуровневый синтез, сборка пользовательских сопроцессоров, ПЛИС-реализация.

REFERENCES

1. Gilles Aubert and Pierre Kornprobst *Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations, Applied Mathematical Sciences*. Springer Science and Business Media, LLC, 2nd ed, 2006, Vol. 147.
2. Haralic R. and Shapiro L., Eds. *Computer and Robot Vision*. 1993, chapter 16, Addison-Wesley.
3. Mumford D. and Shah J. Boundary detection by minimizing functionals, *Proc of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, CA, June 1985, pp. 22–26.
4. Marr D. and Hildreth E. Theory of edge detection, *Proc of the Royal Society*. London B, 207, 1980, pp. 187–217.
5. Kass M., Witkin A. and Terzopoulos D. Snakes: Active contour models, *Int. Journal of Computer Vision*, 1988, Vol. 1, pp. 321–331.
6. Malladi R. Shape modeling with front propagation: A level set approach, *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, Vol. 17, pp. 158–175.
7. Caselles V., Catta F., Coll T. and Dibos F. A geometric model for active contours in image processing, *Numer. Math.*, 1993, Vol. 66, pp. 1–31.
8. Caselles V., Kimmel R. and Sapiro G. On geodesic active contours, *Int. Journal of Computer Vision*, 1997, Vol. 22, No. 1, pp. 61–79.
9. Kimmel R., Osher S. and Paragios N., Eds. *Fast edge integration, Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics*. New York, Springer-Verlag, 2003.
10. Michal Holtzman-Gazit, Ron Kimmel, Nathan Peled and Dorith Goldsher *Segmentation of Thin Structures in Volumetric Medical Images, IEEE Transactions On Image Processing*, 2006, Vol. 15, No. 2.
11. Chan T., Vese L. Active Contours Without Edges, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, Vol. 10, No. 2, pp. 266–277.
12. Stanley Osher and James A. Sethian *Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, Journal of Computational Physics*, 1988, Vol. 79, pp. 12–49.
13. Michael Dossis, Dimitrios Amanatidis and Iosif Androulidakis, *Using Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation algorithm, Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, July 7–9, 2015.
14. Michael F. Dossis *A Formal Design Framework to Generate Coprocessors with Implementation Options, International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*. Science Academy Publisher, United Kingdom. August 2011, Vol. 2, No 4, pp. 929–936. ISSN: 2079–2557, www.sciacademypublisher.com.
15. Michael Dossis *Intermediate Predicate Format for Design Automation Tools, Journal of Next Generation Information Technology (JNIT)*. May 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 100–117.
16. Dossis M. Patent number 1005308, 5/10/2006 by the Greek Industrial Property Organisation, 2006.

TEST GENERATION AND SIMULATION FOR CROSSTALK FAULTS

The main models of crosstalk faults are defined: 1) induced positive and negative pulses, 2) induced delays. The purpose of the work is to increase the effectiveness of the methods of constructing checking tests for digital systems based on an evolutionary approach and models of non-const fault. Formalized statement of the problem of test generation for a single crosstalk faults-induced pulses and delays. It is shown that this problem is reduced to solving a system of logic equations in the multi-valued alphabet. The 8-valued alphabet and multi-valued functions for basic gates are defined. Simulation method was developed in the 8-valued alphabet for crosstalk faults. On this basis, the genetic algorithm is proposed for test generation of single cross-faults. The test generation problem for fault-induced delay is formalized. A genetic algorithm of test generation for fault-induced is proposed. Developed algorithms and software for test generation for crosstalk faults, which improve the quality of test generation by using evolutionary techniques. The approbation of the developed methods is implemented at circuits of international catalogs ISCAS85, ISCAS89, which showed an increase in the completeness of tests by 15%.

Keywords: test generation, crosstalk faults, genetic algorithms, multi valued logic, fault simulation.

NOMENCLATURE

a_i is an aggressor line;
 B_2 is a binary alphabet;
 C_8 is a multivalued alphabet;
 c_i is a capacitive value;
 DF is a reducing delay;
 DR is an increasing delay;
 f_i is a primary output
 FT is a backward front;
 f_a is an evaluation of aggression;
 f_e is an evaluation of excitation;
 f_p is an evaluation of propagation;
 f_f is a fitness-function;
 $g()$ is a victim-line function;
 $h()$ is an aggressor-line function;
 n is a number of primary variables;
 NG is a negative pulse;
 P_c is a crossover probability;
 PG is a positive pulse;
 P_m is a mutation probability;
 RT is a forward front;
 $S0$ is a static zero signal;
 $S1$ is a static one signal;
 s_i is a flag of belonging the subject line a_i ;
 x_i is a primary input variable.

INTRODUCTION

The diagnostics of modern digital systems and their element base increasing need of the analysis of not only stuck-at faults, but also of more adequate models of physical defects. Technological progress leads to density increasing on chip, rising number of crossings in conductive layers and speeding-up time frequency. As a result, the analysis of physical defects affecting on time parameters of a circuit and crossings in conductive layers is need. Especially it is concerned deep submicron level design.

Increasing transistor number on chip leads to that bigger number of element switches simultaneously and reduces

voltage level of elements, and enlarges delay time. At the same time, some crossing lines, which are suppose to be electrically isolated, can interfere with each other. One of such interactions, produced by parasitic coupling between conductors, is called «crosstalk», and can bring to functional problems, to performance degradation and makes worse time characteristics.

The purpose of the work is to increase the effectiveness of the methods of constructing checking tests of digital systems based on an evolutionary approach and models of non-constfault.

1 PROBLEM STATEMENT

Let the states of victim-line g and aggressor-line h are described by the Boolean functions of primary inputs variables, $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ and $h(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Similar on every j -th primary output it is implemented Boolean function $f_j(g, h, x_1, x_2, \dots, x_n)$, which depends of primary input variables $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ and internal variables g and h .

For crosstalk fault detection with positive pulse (glitch) it is necessary the primary inputs values, which guarantee on aggressor-line h front RT , and on victim-line g – $S0$ in fault-free case. Then for given positive glitch crosstalk fault test generation problem is reduced to searching solution of following Boolean equations system (1)–(3):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = RT, \quad (1)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = S0, \quad (2)$$

$$F_j(S0, R, x_1, x_2, \dots, x_n) \oplus F_j(PG, R, x_1, x_2, \dots, x_n) = 1, \quad (3)$$

where (1) RT guarantees value on the aggressor-line h , (2) – the $S0$ value on the victim-line g and guarantees propagation of positive glitch effect from the victim-line g to some primary output.

Similar for crosstalk detection with negative glitch it is necessary primary inputs values that set-up value FT on aggressor-line h and on victim-line g value $S1$. Then for

negative glitch test generation problem is reduced to searching solution of following Boolean equations system (4)–(5):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = FT, \quad (4)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = S1, \quad (5)$$

$$F_j(S1, FT, x_1, x_2, \dots, x_n) \oplus F_j(NG, FT, x_1, x_2, \dots, x_n) = 1. \quad (6)$$

The test generation problem for the crosstalk delay fault of backward/forward front is reduced to searching solution of following Boolean equations system (7)–(9):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = FT / RT, \quad (7)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = RT / FT, \quad (8)$$

$$F_j(FT / RT, RT / FT, x_1, x_2, \dots, x_n) = DR,$$

where (7) FT/RT guarantees value on the aggressor-line h , (8) –RT/ FT value on the victim-line g and (9) guarantees propagation of crosstalk delay effect from the victim-line g to some primary output. In the right parts of equations (7) and (8) we cited two values through slant line for backward/forward front cases.

Obviously that checking test for crosstalk faults should consist of pattern pairs, which guarantee mentioned above conditions. If the above formulated equation systems do not have solution then crosstalk induced pulse and delay faults are undetectable at least in this problem setting.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The works in the area of crosstalk fault simulation and test generation are carried out since middle of 90-th and are urgent for theory and practice of reliable design and diagnostics of modern digital devices. They are based on the application of different approaches such as timing analysis, multivalued logics, critical path method, PODEM algorithm modifications, structural deterministic and simulation based methods etc [1–3]. There are considered two basic types of crosstalk faults: crosstalk induced pulses and crosstalk induced delays.

In the first case, quickly switching conductive line – *aggressor*, can induce short pulse on static line – *victim*. First type faults are often named «crosstalk glitch» and caused by parasitic inducing between neighbor conductor lines, which have inductive and capacitive constituents in general. Depending on amplitude and width these pulses can essentially effect on circuit characteristics [1, 4].

In the second case, an induced delay takes place when on aggressor and victim lines (almost) synchronous signal crossings are happened. If on both lines crossings have the same direction then crossing time is reduced, and hence, signal propagation delay time is reduced. This effect is called crosstalk speedup. If signal crossing have opposite directions then crossing time increases and effect of crosstalk slowdown takes place [2]. If induced noise is over the boundary voltage or induced delay exceeds allowed value on victim line then it can lead to logical failures and functional problems on neighbor flip-flops or outputs.

Research on modeling and testing «crosstalk» faults since the mid90s. In [2] it was suggested the method, that is

based on search of input pattern pair that sets up defined value of signal on victim-line and excites crossing on aggressor-line, which provide fault effect propagation to primary outputs. Crosstalk induced pulses were considered in this paper. The authors in [3–5] have developed a mixed test signal generator XGEN for «crosstalk» induced delays. They suggested a mixed test generation method, where analog simulation allowing evaluating signal delays is used in binary patterns search.

Using Laplace transform they received expressions of faults «crosstalk» in the s-domain, which are used to analyze the dependence of the attributes of the pulse in the circuit with lumped parameters and temporal characteristics of fronts. Static timing analysis allows to define the time windows for inputs and outputs of elements. The required time window is determined as the intersection of time windows «aggressor» and «victim». For a given failure – a particular pair of «aggressor-victim» approach allows to set the required values for interacting lines and extend the influence of the fault to the external output.

During test generation is used 11-digit alphabet and modification of PODEM at step justification. The developed algorithm does not guarantee the generation of tests as a result of restrictions on the conditions of propagation effects of malfunctions and used (11-valued) logic system.

In [6], the authors have developed a model path delays in combination with a critical path and the sources set, by interacting with it. It is used as a basis for test generation method for the fault of the «propagation delay» without phase justification. And on the stage justification it applies genetic algorithm, which uses in the process of test generation temporal characteristics.

Further, this approach was developed in [7], which provides a solution to the problem of test generation in the case of many of the «aggressors», so acting a certain way. Here the implication graph is constructed which allows for the logical and structural information schemes to check conflicts in the process of test generation.

The paper [8] is devoted to testing of faults «crosstalk» – induced delays. An algorithm for test construction uses the generation of critical paths based on static timing analysis of the circuit. Testability of sustainability criteria used for checking the sensitivity of paths. To activate the sensor path pair «aggressor-victim» in a way to maximize the impact of the aggressor on the path and cause the signal propagation delay along this path.

In [9], a test generator unit based on accurate delay pattern is proposed. It is activated by a subpath to meet the conditions of signal transitions. Known fault model of the «delay» is modified for testing of induced delays. To reduce the set of analyzed faults preprocessing is performed to critical paths.

The authors in [10] have developed a method based on test generation PODEM. To test the «crosstalk» must be necessary transitions to the external inputs and provide a propagation of the influence of the fault on the external output. Each of these tasks is formulated separately, and the final decision is the result of crossing making these tasks. The 11-valued alphabet and PODEM method modification at justification stage are used during test

generation. Developed method does not guarantee test generation in consequence of restrictions for fault effects propagation conditions and using logical system.

In [12] to solve the problem of test generation for «crosstalk» is used 0–1 integer programming based on traditional algorithms for stuck-at faults. Maximum activation of the aggressor is formulated in terms of linear programming, and the impact of the propagation of the fault is solved by traditional means. It should be noted that all of the above papers in the test generation using mechanisms of «turning back» scheme that require significant computing resources. On the other hand there is a group of methods, which are based on modeling and did not require a «bounce back».

These include, for example, [13] where the simulation is used to test the cross-faults. It uses an algorithm for editors fault-candidates, which allows to obtain a compact set of target faults due to the exclusion of those problems that can never be activated and detected. Here editing algorithm for faults-candidates is used that allow get compact set of target faults due to exclusion that faults, which never can not be excited and detected. Under that sequential fault path delay simulator was applied. Except that analog macro model for evaluation of signal delays in consequence of crosstalk interfering is used. Here one aggressor-victim pair is associated with every crosstalk fault. Input patterns are generated randomly during search process. Authors of [14] suggested fault simulator that considers one victim-line and set of aggressor-lines. Binary logical simulation and, as a base, stuck-at faults tests are used in test generation. Note that simulation-based methods demand good heuristics for test pattern generation and generated test sequences have big length, as a rule.

3 MATERIALS AND METHODS

An application of multivalued alphabets, which allow more adequate simulate physical processes in digital devices at logical level, is widely used method to increase effectiveness test generation and simulation algorithms for digital circuits [4]. In table 1 there is represented multivalued alphabet C_8 (its symbols, encoding and physical interpretation), which we suggested to use in test generation and simulation algorithms for crosstalk faults.

Note that the primary inputs variables can take only following four values: «static 0» S0 ($0 \rightarrow 0$), «static 1» S1 ($1 \rightarrow 1$), forward front RT ($0 \rightarrow 1$), backward front FT ($1 \rightarrow 0$). Internal lines variables also can accept following additional values PG (positive pulse), NG (negative pulse), DR (increasing delay), DF (reducing delay).

From table 1 we can see that initial signals are binary in fact. But it is more effective to simulate and compute in terms of multivalued alphabet symbols, which allow to process several clocks simultaneously. So the C_8 symbols belong to Cartesian product of binary alphabets B_2 : $C_8 \subseteq B_2 \times B_2 \times B_2$.

For logical simulation purposes we should define logical functions for basic gates in the terms of C_8 alphabet. We can do it in table form that is enough effective for simulation goals. The table model for the basic gates AND, OR, NOT are defined constructively on the base of physical sense of C_8 symbols and functionality logics of given gates, and there is represented in tables 2–4.

Table 1 – Multivaluedalphabet C_8

Symbol C_8	Interpretation	Binary encoding		
		tt-1	tt	t+1
S0	Static 0	00	00	00
S1	Static 1	11	11	11
RT	Forward front	00	11	11
FT	Backward front	11	00	00
PG	Positive pulse	00	11	00
NG	Negative pulse	11	00	11
DR	Increasing delay	00	00	11
DF	Reducing delay	11	11	00

Table 2 – Definition of gate AND in C_8 alphabet

AND	S0	S1	R	F	PG	NG	DR	DF
S0	S0	S0	S0	S0	S0	S0	S0	S0
S1	S0	S1	R	F	PG	NG	DR	DF
R	S0	R	R	S0	PG	DR	DR	PG
F	S0	F	S0	F	S0	F	S0	F
PG	S0	PG	PG	S0	PG	U	S0	S0
NG	S0	NG	DR	F	S0	NG	DR	F
DR	S0	DR	DR	S0	S0	DR	DR	S0
DF	S0	DF	PG	F	PG	F	S0	S0

Table 3 – Definition of gate OR in C_8 alphabet

OR	S0	S1	R	F	PG	NG	DR	DF
S0	S0	S1	R	F	PG	NG	DR	DF
S1								
R	R	S1	R	S1	R	S1	R	S1
F	F	S1	S1	F	DF	NG	NG	DF
PG	PG	S1	R	DF	PG	S1	R	DF
NG	NG	S1	S1	NG	S1	NG	NG	S1
DR	DR	S1	R	NG	R	NG	DR	S1
DF	DF	S1	S1	DF	DF	S1	S1	DF

Table 4 – Definition of gate OR in C_8 alphabet

NOT	S0	S1	R	F	PG	NG	DR	DF
	S1	S0	F	R	NG	PG	DF	DR

Let consider a combinational circuit with primary inputs (x_1, x_2, \dots, x_n) and primary outputs (f_1, f_2, \dots, f_m) that have crosstalk fault on some line. Under test generation for crosstalk faults it is necessary:

- find out input patterns, which cause required signal transient on aggressor line;
- find out input patterns guaranteeing necessary static signal on victim line;
- find out input patterns propagating arisen crosstalk effect from victim line to primary outputs.

Consider the problem of the test generation for multiple delay faults induced by the various lines of aggressors. In this case, the victim lines are included in some path, connecting the external input to an external output of the circuit [2].

The set of the aggressor lines is formed by those lines, which could affect the victim line and thus cause a delay of signal propagation in the specified path. In solving this problem must be solved at least three sub-tasks [2]: 1) selecting the set of critical paths, forming a line of victims; 2) The choice of the set of aggressor lines for a given critical path; 3) generation of input test pair patterns that check-induced delay for a given circuit path and the set of aggressors lines.

Selection of multiple aggressor lines set for given victim line can be formalized as follows. Let $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ is the set of possible aggressors lines. For each aggressor line a_p , we define c_i – the extent of its effect at the victim, which is determined, above all, the value of the capacitive coupling between these lines.

Next, we define a set of Boolean variables $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, where each variable s_i corresponds to its aggressor a_i . At the same time

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{if } a_i \text{ belong to current aggressor set;} \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

That is, each variable s_i is a flag of belonging the subject line a_i to the current set of line-aggressors. Then the degree of effect of the current set of aggressors to the victim line

$$\text{can be defined as } \sum_{i=1}^m s_i \cdot c_i.$$

To maximize cross-induced delay for the current set of aggressors, should be excited so that the effect of delay at the victim line was a maximum. So it is necessary to find a

Boolean vector S , which takes place $\max \sum_{i=1}^m s_i \cdot c_i$ and execute

the necessary logical conditions for generation the test pair [2]. Obviously, this task has the overhaul nature and is NP-hard. In the worst case would have to go through all possible set subsets of 2^m aggressor lines.

4 EXPERIMENTS

Crosstalk fault simulation is executed on the base of the event-driven simulation using multivalued alphabet C_8 [4]. The simulation goal is checking crosstalk fault detection by given input sequence. The generalized crosstalk fault simulation algorithm for both crosstalk faults is given below.

```

Crosstalk fault simulation (combinational
logical circuit, input sequence T, line pair
aggressor, victim){
Circuit description input;
Circuit initialization;
Input sequence T entry;
Crosstalk fault entry;
FOR every pattern of input sequence T{
Multivalued input pattern generation in  $C_8$ 
alphabet;
If (condition crosstalk fault appearance){
Crosstalk fault effect entry and activation for
given line pair(aggressor, victim);
Input pattern fault-free and fault simulation;
If (there is primary output with crosstalk
effect) given crosstalk fault is detected;
}
}
}

```

For positive and negative pulse induced crosstalk effect entry PG and NG values should be set up on victim-line in the process of fault simulation.

The example 1 of multivalued logical simulation in C_8 alphabet is represented on figure 1 for circuit C17 from benchmark ISCAS85. The positive glitch fault between aggressor-line 19GAT(7) and victim-line 16GAT(8) is considered. Note that the values for one test pair detected given fault are represented here (Fig. 1).

The example 2 of delay induced fault for circuit C17 between victim-line h and aggressor-line i is presented on the Fig. 2. In this case we can set forward front value RT on aggressor-line I and backward front value FT at victim-line.

Genetic algorithm and multi-valued logic can be used in test pattern search process [15, 16]. At that the genetic algorithm provides a mechanism of random direct search of test patterns pairs, which satisfy noted conditions. To our point of view, application of evolutionary methods in test generation for considered faults is more justified then for classical stuck-at faults. It can be drawn an analogy with numerical optimization problems where evolutionary approach is used in cases of inapplicability of classical gradient methods first of all. It is necessary to note that genetic algorithms allow reduce synthesis problem to analysis problem (in some sense). Under condition of analysis tools presence (fault-free or faulty circuit simulators) genetic algorithms provide direct random search for synthesis problem solution. Under that synthesis and analysis problems can be considered at different levels.

Classical «simple» GA uses three basic operators: reproduction, crossover and mutation. Using these operators, the population (the set of individuals-solutions of considered problem) evolves from one generation to another. Classical steady state GA may be represented as the following sequence of operations that is shown in flow chart of fig. 3.

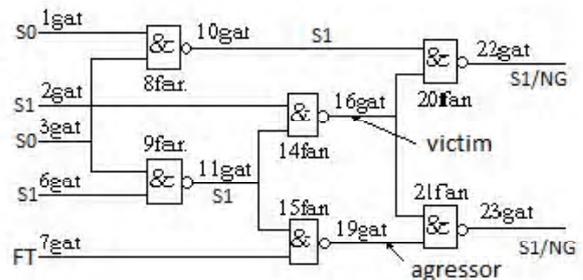


Figure 1 – Logical simulation of positive glitch in circuit C17

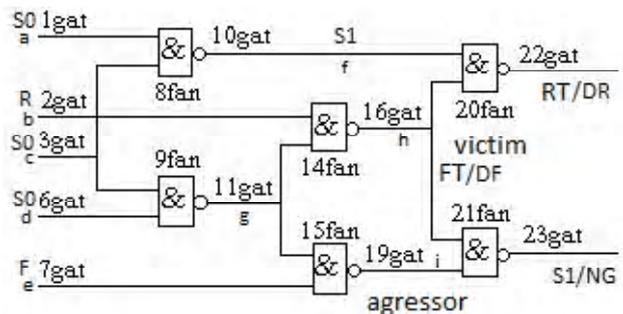


Figure 2 – Logical simulation of delay induced fault in circuit C1

In developed test generation genetic algorithm the initial population of size N is generated randomly. Here each chromosome (x_1, x_2, \dots, x_n) is of length $2n$ bits, where n is the inputs number. Note that each input $x_i \in B_2 \times B_2$ corresponds two consecutive bits, representing one of four values S0, S1, RT and FT. The set of such pattern pairs is population.

Generation of new population is done with using following genetic operators. The tournament selection is used here. On tournament selection [4,5] m individuals are chosen randomly, then the best one of them is selected as potential parent. This procedure is continued until intermediate population is not formed. Here selection parameter is $2 \leq m \leq N (m=2,3)$. Then crossover is performed with a high probability P_c . As crossover operator we apply uniform crossover in this case (Fig. 4).

The formed offspring are mutated with a low probability $P_m \ll 1$ and inserted in current population. The classical mutation operator is used. But it is applied for two-bit groups instead one bit according to values S0, S1, RT and FT.

Parent selection is biased towards patterns with good cover faults properties. We define fitness-function as linear combination of three component:

$$f_f = w_e f_e + w_p f_p + w_c f_a, \quad (10)$$

where f_e evaluates input pattern – individual ability to excite necessary value on victim-line, f_p evaluates individual ability to propagate crosstalk effect to primary outputs, f_a evaluates input pattern – individual ability to take into account aggressor lines effect. To evaluate fitness-function components results of logical simulation in multi-valued alphabet C_8 is used. The next population is generated based on the current population with using the same genetic operators. The process is repeated until the stop criterion is fulfilled.

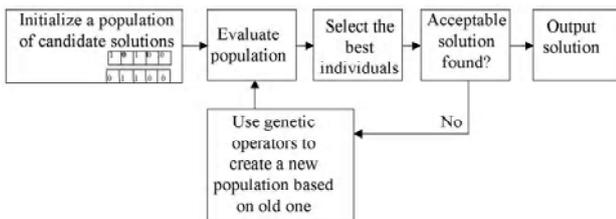


Figure 3 – Classical «simple» GA flowchart

Mask OC	1	0	1	0	1
1-st parent	1	1	0	1	1
	0	0	0	1	0
	↓		↓		↓
Offspring	1	0	0	0	1
	0	1	0	0	0
		↑		↑	
2-nd parent	0	0	0	0	1
	1	1	1	0	1

Figure 4 – Uniform crossover operator

When implementing the proposed approach based Finite State Machines programming [17], which allows to use object-oriented features of faults. In addition, this approach allows to go from a simple genetic algorithm to genetic programming that enables to operate with more complex data structures of various dimensions for potential solutions and extend a class of simulated faults.

5 RESULTS

For example 1, the simulation results show that positive glitch fault between aggressor-line 19GAT(7) and victim-line 16GAT(8) is detected on the both output lines for the multivalued input pattern 1gat=S0, 2gat=S1, 3gat=S0, 6gat=S1, 7gat=FT, which corresponds to input test pair 1gat=0->0, 2gat=1->1, 3gat=0->0, 6gat=1->1, 7gat=0->1.

For example 2, on the figure 2 it is represented the example of multivalued test pattern 1gat=S0, 2gat=RT, 3gat=S0, 6gat=S0, 7gat=FT, which detects given delay induced fault for circuit C17 at the lines 16gat=DF (forward front delay) 22gat=DR (backward front delay).

The proposed method testing was performed at the circuits of international catalogs ISCAS85, ISCAS89, which according to international standards adopted to test new methods of test generation. For a subset of ISCAS85, ISCAS89 a number of computer experiments were performed which confirm the effectiveness of the developed methods. The results of test generation for single cross-fault type including positive (negative) induced impulse and induced delay are represented at table 5.

Except single cross-faults, the experiments were also performed for cross faults with many aggressors. The results are shown in Table 6.

6 DISCUSSION

It is seen that the average genetic algorithm provides a 2-fold greater fault coverage than random method. At the same time, for the combinational circuits fault coverage is 70%. Note that for certain schemes (eg. S526, S420.1, S1238) pseudo-random method does not generate check tests. For sequential circuits are somewhat worse results, and the average completeness of test is about 40%. But it should be noted that many of the faults marked as targets (the number of which is shown in the 2nd column tabl.6 is not feasible, due to contradictory logical conditions and, therefore, the actual fault coverage for cross fault is much higher.

CONCLUSIONS

It was shown for combinational digital circuits that application of genetic algorithms and multivalued event-driven simulation in C_8 alphabet allows effectively solving the test generation problem for crosstalk faults.

Table 5 – Test generation for single cross talk faults

Circuit	Fault coverage			
	Positive impulse PG	Negative impulse NG	Delay front DR	Delay back front DR DF
C432	98.05	99	100	98.01
C499	99	84.81	99.4	99.8
C880	97.09	95.13	98.16	98.85
C1355	88.15	94.41	99.18	99.43
C1908	89.75	96.77	95.63	93.88
C2670	90.31	94.15	94.71	90.45
C5315	99.70	99.87	99.71	99.72
C6288	99.91	98.97	99.31	99.32
C7552	97.23	98.28	99.05	97.03

Table 6 – Test generation for cross talk faults with many aggressors

Circuit	Number of target faults	Fault coverage, %		Time (sec)
		Pseudo random	Genetic algorithm	
C17	42	45.23	62.05	0.18
C432	9327	59.52	70.15	241.14
C449	21879	30.27	71.81	591.17
C880	9279	2.31	47.53	628.14
S27	74	6.78	37.87	0.39
S208	743	30.96	32.43	6.42
S208.1	558	1.63	45.21	12.72
S298	537	43.04	62.58	9.43
S344	1190	64.38	66.14	18.53
S349	1197	30.51	57.92	19.24
S526	891	0.3	19.23	21.34
S386	4195	15.81	25.51	58.04
S510	1098	36.83	43.87	14.73
S420.1	1276	0.3	36.93	63.95
S820	7738	26.34	35.41	166.42
S1196	10630	0.3	14.61	782.45
S1238	5822	0.2	13.51	531.23
S1488	4305	18.43	22.45	184.52
S1494	4283	18.23	18.43	165.42
average		22.70	41.24	185.02

The problem of test generation for the new class not s-a-constant faults is characteristic for modern digital circuits, which have a high density of elements and high operating frequencies. It is proposed a multi-valued alphabet C_8 , developed models of multi-valued logic elements to this alphabet, which allows to effectively simulate the cross-faults.

The modified genetic algorithm is designed for generation of test input pattern pairs, checking single fault «induced impulses».

Also the problem of the test generation for single cross faults such as «induced delay is considered. Has received the further development of the method of multi-valued logic simulation in the alphabet, which allows you to simulate the new class is not constant – as a cross-fault-induced pulses and induced delays. Modified genetic algorithm for constructing test sets of pairs of input sequences that cross-check single failure of the» induced delay. The problem of test generation for fault-induced delay with many lines-aggressors is considered.

A software module developed by a multi-valued simulation and genetic algorithms for constructing tests for non-classical (constant) cross-faults, which are integrated into the system simulation and test generation ASMIDA.

Completed testing and verification of the effectiveness of the developed software modules for the logic circuits are not the fault of the international classical catalogs and ISCAS85 ISCAS89, who confirmed to achieved high performance characteristics.

REFERENCES

1. Скобцов Ю. А. Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский, В. Ю. Скобцов : учебное пособие. – М. : Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2012. – 439 с.
2. Rubio A. An approach to the analysis and detection of crosstalk faults in digital VLSI circuits / A. Rubio, N. Itazaki, X. Xu, K. Kinoshita // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1994. – Vol. 13, № 3. – P. 387–394.
3. Chen W. Y. Analytic Models for Crosstalk Delay and Pulse Analysis under Non-Ideal Inputs / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // International Test Conference, Washington, Nov. 1997 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 1997. – P. 809–818. DOI:10.1109/TEST.1997.639695.
4. Chen W. Y. Test generation for Cross-Induced Delay / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // International Test Conference, Atlantic City, 28–30 September 1999 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 1999. – P.191–200. DOI:10.1109/TEST.1999.805609
5. Chen W. Y. Test generation for Cross-Induced Faults: Framework and computational results / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 2002. – Vol. 16. – P. 17–28.
6. Krstic A. Delay Testing Considering Cross-Induced Effects / A. Krstic, J.-J. Liou, Y.-M. Jiang, K.-T. Cheng // International Test Conference, Baltimore, 30 October-01 November 2001 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2001. – P. 558–567. DOI:10.1109/TEST.2001.966674.
7. Bai X. HyAC: A Hybrid Structural SAT Based ATPG for Crosstalk / X. Bai, S. Dey, A. Krstic // International Test Conference, Washington, 30 September–2 October 2003 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2003. – P. 112–121. DOI:10.1109/TEST.2003.1270831.
8. Arunachalam A. A Novel Algorithm for Testing Crosstalk Induced Delay Faults in VLSI Cicuits / A. Arunachalam, R. Arunachalam // International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2005. – P. 479–484.
9. Li H. Selection of Crosstalk-induced Faults in Enhanced Delay test / H. Li, X. Li // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 2005. – Vol. 21, № 2. – P. 181–195.
10. Palit A. K. Test Pattern Generation for Crosstalk Faults in DSM chips using Modified PODEM / A. K. Palit, K. K. Duganapalli, W. Anheier // Electronics System integration Technology Conference, Greenwich, 1–4 September 2003 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2003. – P. 393–398. DOI:10.1109/ESTC.2008.4684311.
11. Chun S. XPDF-ATPG: An Efficient Test Pattern Generation for Crosstalk-Induced Faults/ S. Chun, Y. Kim, M.-H. Yang, S. Kang // Asian Test Symposium, Sapporo, 23–24 November 2008 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2008. – P. 83–88.
12. Ganeshpure K. P. On ATPG for Multiple Aggressor Crosstalk Faults in Presence of Gate Delays / K. P. Ganeshpure, S. Kundu // International Test Conference, Santa Clara, 23–25 October 2007 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2007. – P. 1–7.
13. Chary Sh. Automatic path delay test generation for combined Resistive Vias Resistive bridges and Capacitive Crosstalk delay faults / Sh. Chary, M. L. Bushnell // International conference on VLSI Design, Hyderabad, 3–7 January 2006. – Los Alamitos : IEEE, 2006. – P. 413–418.
14. Phadoongsidhi M. SCINDY: Logic Crosstalk Delay Fault Simulation in Sequential Circuits / M. Phadoongsidhi, K. K. Saluja // International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2005. – P. 820–823.
15. Скобцов Ю. А. Эволюционные вычисления : учебное пособие / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский. – М. : Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2015. – 331 с.
16. Skobtsov Yu. A. Evolutionary test generation methods for digital devices / Yu. A. Skobtsov, V. Yu. Skobtsov // Design of Digital Systems and Devices / [eds.: M.Adamski et al.]. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – P. 331–361. – (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 79).
17. Шальто А. А. Автоматное программирование / А. А. Шальто, Н. И. Поликарпова. – Спб. : Питер, 2009. – 176 с.

Article was submitted 30.04.2015.

After revision 26.06.2015.

Скобцов Ю. О.¹, Скобцов В. Ю.², Шальто А. А.³

¹Д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою АСУ Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник лабораторії проблем захисту інформації Об'єднаного інституту проблем інформатики НАН Білорусі, Мінськ, Білорусь

³Д-р техн. наук, професор, зав. кафедри технології програмування Університету інформаційних технологій, механіки та оптики, Санкт-Петербург, Росія

ПОБУДОВА ТЕСТІВ І МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПЕРЕХРЕСНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Розглянуто основні моделі перехресних несправностей (crosstalkfaults): 1) індуковані позитивні і негативні імпульси, 2) індуковані затримки. Мета роботи – підвищення ефективності методів побудови перевіряльних тестів цифрових систем на основі еволюційного підходу і моделей неконстантних несправностей. Формалізована постановка задачі генерації перевіряльного тесту для одиночних перехресних несправностей – індукованих імпульсів і затримок. Показано, що ця задача зводиться до розв'язання системи логічних рівнянь в багатозначному алфавіті. Визначено 8-значний багатозначний алфавіт і функції основних вентилів у цьому алфавіті. Отримав розв'язок метод моделювання перехресних несправностей в 8-значному алфавіті. На цій основі розроблено генетичний алгоритм побудови перевіряльних тестів для одиночних перехресних несправностей. Розглянуто задачу генерації перевіряльного тесту для несправності індукована затримка. Запропоновано генетичний алгоритм побудови перевіряльних тестів для несправності індукована затримка. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для генерації тестів для перехресних несправностей, яке дозволяє підвищити якість перевіряльних тестів за рахунок використання еволюційних методів та моделей неконстантних несправностей. Проведено апробацію розроблених методів на схемах міжнародних каталогів ISCAS85, ISCAS89, яка показала збільшення повноти тестів на 15%.

Ключові слова: побудова тестів, перехресні несправності, генетичний алгоритм, багатозначна логіка, моделювання пошкоджень.

Скобцов Ю. А.¹, Скобцов В. Ю.², Шальто А. А.³

¹Д-р техн. наук професор, зав. кафедрою АСУ Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, ведучий научний співробітник лабораторії проблем захисту інформації Об'єднаного інституту проблем інформатики Національної академії наук Білорусі, Мінськ, Білорусь

³Д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою технології програмування Університету інформаційних технологій, механіки та оптики, Санкт-Петербург, Росія

ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Рассмотрены основные модели перекрестных неисправностей (crosstalkfaults): 1) индуцированные положительные и отрицательные импульсы, 2) индуцированные задержки. Цель работы – повышение эффективности методов построения проверяющих тестов цифровых систем на основе эволюционного подхода и моделей неконстантных неисправностей. Формализована постановка задачи генерации проверяющего теста для одиночных перекрестных неисправностей – индуцированных импульсов и задержек. Показано, что эта задача сводится к решению системы логических уравнений в многозначном алфавите. Определен 8-значный многозначный алфавит и функции основных вентилов в этом алфавите. Получил развитие метод моделирования перекрестных неисправностей в 8-значном алфавите. На этой основе разработан генетический алгоритм построения проверяющих тестов для одиночных перекрестных неисправностей. Рассмотрена задача генерации проверяющего теста для неисправности индуцированная задержка. Предложен генетический алгоритм построения проверяющих тестов для неисправности индуцированная задержка со многими линиями-агрессорами. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для генерации тестов для перекрестных неисправностей, которое позволяет повысить качество проверяющих тестов за счёт использования эволюционных методов. Проведена апробация разработанных методов на схемах международных каталогов ISCAS85, ISCAS89, которая показала увеличение полноты тестов на 15%.

Ключевые слова: генерация тестов, перекрестные неисправности, генетический алгоритм, многозначная логика, моделирование неисправностей.

REFERENCES

- Skobtsov Yu. A., Spieransy D. V., Skobtsov V. Yu. Modelirovanie, testirovanie i diagnostika tsifrovyykh ustroystv. Moscow, National Open University «INTUIT», 2012, 439 p.
- Rubio A., Itazaki N., Xu X., Kinoshita K. An approach to the analysis and detection of crosstalk faults in digital VLSI circuits, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1994, Vol.13, No. 3, pp. 387–394.
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Analytic Models for Crosstalk Delay and Pulse Analysis under Non-Ideal Inputs, *International Test Conference, Washington, Nov. 1997 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 1997, pp. 809–818. DOI:10.1109/TEST.1997.639695.
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Test generation for Cross-Induced Delay, *International Test Conference, Atlantic City, 28–30 September 1999 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 1997, pp. 191–200. DOI:10.1109/TEST.1999.805609
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Test generation for Cross-Induced Faults: Framework and computational results, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2002, Vol. 16, pp. 17–28.
- Krstic A., Liou J.-J., Jiang Y.-M., Cheng K.-T. Delay Testing Considering Cross-Induced Effects, *International Test Conference, Baltimore, 30 October 01 November 2001 : proceedings*. Los Alamitos: IEEE, 2001, pp. 558–567. DOI:10.1109/TEST.2001.966674.
- Bai X., Dey S., Krstic A. HyAC. A Hybrid Structural SAT Based ATPG for Crosstalk, *International Test Conference, Washington, 30 September – 2 October 2003 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2003*, pp. 112–121. DOI:10.1109/TEST.2003.1270831.
- Arunachalam A., Arunachalam R. A Novel Algorithm for Testing Crosstalk Induced Delay Faults in VLSI Ciuuits, *International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2005, pp. 479–484.
- Li H., Li X. Selection of Crosstalk-induced Faults in Enhanced Delay test, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2005, Vol. 21, No. 2, pp. 181–195.
- Palit A. K., Duganapalli K. K., Anheier W. Test Pattern Generation for Crosstalk Faults in DSM chips using Modified PODEM, *Electronics System integration Technology Conference, Greenwich, 1–4 September 2003 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2003, pp. 393–398. DOI:10.1109/ESTC.2008.4684311.
- Chun S. Kim Y., Yang M.-H., Kang S. XPDF-ATPG: An Efficient Test Pattern Generation for Crosstalk-Induced Faults, *Asian Test Symposium, Sapporo, 23–24 November 2008 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2008, pp. 83–88.
- Ganeshpure K. P., Kundu S. On ATPG for Multiple Aggressor Crosstalk Faults in Presence of Gate Delays, *International Test Conference, Santa Clara, 23–25 October 2007 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2007, pp. 1–7.
- Chary Sh., Bushnell M. L. Automatic path delay test generation for combined Resistive Vias Resistive bridges and Capacitive Crosstalk delay faults, *International conference on VLSI Design, Hyderabad, 3–7 January 2006*. Los Alamitos, IEEE, 2006, pp. 413–418.
- Phadoongsidhi M., Saluja K. K. SCINDY: Logic Crosstalk Delay Fault Simulation in Sequential Circuits, *International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2005, pp. 820–823.
- Skobtsov Yu. A., Spieransky D. V. Evolutsionnyye vychislenia. Moscow, National Open University «INTUIT», 2015, 331 p.
- Skobtsov Yu. A., Skobtsov V. Yu. Evolutionary test generation methods for digital devices, *Design of Digital Systems and Devices*. [eds.: M.Adamski et al.]. Berlin, Springer-Verlag, 2011, pp. 331–361. – (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 79).
- Shalyto A. A., Polikarpova N. I. Avtomatnoe programmirovaniye. Sankt-PeterburgPiter, 2009, 176 p.

УДК 004.052.42: 004.053: 004.94

Шкарупило В. В.¹, Кудерметов Р. К.², Польська О. В.³

¹Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

DEVS-ОРІЄНТОВАНА МЕТОДИКА ВАЛІДАЦІЇ КОМПЗИТНИХ ВЕБ-СЕРВІСІВ

Запропоновано методику валідації композитних веб-сервісів за рахунок синтезу імітаційних дискретно-подійних моделей на основі формалізму DEVS. Це дозволяє виконувати автоматизовану перевірку придатності таких систем до цільового використання при проектуванні шляхом імітаційного моделювання. В якості вхідних даних використано формальну специфікацію на основі темпоральної логіки TLA, що дозволяє математично строго представляти функціональні характеристики композитних сервісів у форматі обчислювальних процесів. За аналітичну модель в основі TLA-специфікації взято структуру Кріпке. У межах методики запропоновано правила синтезу із вихідної TLA-специфікації DEVS-моделі композитного сервісу, призначеної бути засобом валідації. Результуюча DEVS-модель складається із моделей атомарних сервісів, моделі клієнта композитного сервісу та моделі координатора атомарних сервісів, що функціонує згідно специфікації WS-BPEL.

Для перевірки методики проведено експериментальні дослідження, що підтвердили адекватність результуючої DEVS-моделі. Перевірку здійснено згідно запропонованого підходу, що полягає у порівнянні результатів валідації шляхом імітаційного моделювання із результатами валідації шляхом тестування. За результатами проведених досліджень обґрунтовано доцільність використання запропонованої методики при проектуванні композитних сервісів, що базується на зменшенні часових витрат на валідацію. Наголошено на доречності використання методики при ітераційній розробці.

Ключові слова: SOA, WS-BPEL, композитний веб-сервіс, специфікація, верифікація, валідація, TLA, DEVS.

НОМЕНКЛАТУРА

AWS – Atomic Web Service;
CPU – Central Processing Unit;
CWS – Composite Web Service;
DEVS – Discrete Event System Specification;
JAX-WS – технологія створення атомарних веб-сервісів;
ODE – Orchestration Director Engine;
RAM – Random-access Memory;
SOA – Service-oriented Architecture;
TA – Timed Automata;
TLA – Temporal Logic of Actions;
UML – Unified Modeling Language;
WS-BPEL – Web Services Business Process Execution Language;
ОП – обчислювальний процес;
activate – повідомлення активації моделі *MG*;
AP – множина атомарних висловлювань (літералів);
Atomics – множина атомарних моделей у складі результуючої моделі CWS;
break – функція видалення міжпортових зв'язків DEVS-моделі CWS;
Calc – умовне позначення TLA-специфікації окремого ОП;
Cnd – умовне позначення специфікації розмітки $L(s)$;
D – множина допустимих значень змінних станів;
e – час, що пройшов від останнього переходу $(s, s') \in R$;
ev – повідомлення активації моделі MA_i ;
F – статистичний критерій Фішера;

$f_1(x)$ – функція залежності часових витрат на моделювання від затримок AWS;

$f_2(x)$ – функція залежності оціночних значень показника ξ_{nf}^s від затримок AWS;

$f_3(x)$ – функція залежності фактичних значень показника ξ_{nf}^t від затримок AWS;

Init – умовне позначення TLA-специфікації розмітки $L(s_0)$ структури Кріпке;

IP – множина вхідних портів складеної (результуючої) DEVS-моделі CWS;

job_j – *j*-а заявка на обслуговування;

L – функція розмітки станів системи переходів;

$L(s)$ – розмітка поточного стану системи переходів;

$L(s')$ – розмітка наступного стану системи переходів;

m – кількість AWS у складі CWS;

m' – фактична кількість AWS у складі CWS, необхідна для окремого ОП;

MA_i – базова DEVS-модель *i*-го AWS;

MC – базова модель координатора AWS;

MG – базова модель клієнта (генератора заявок на обслуговування);

OP – множина вихідних портів складеної (результуючої) DEVS-моделі CWS;

R – множина переходів між станами;

res₄ – шуканий результат експериментальних обчислень;

rs – повідомлення-результат роботи моделі MA_i ;

S – множина станів системи переходів;

s_0 – початковий стан системи переходів;

s – поточний стан системи переходів;
 s' – наступний стан системи переходів;
 set – функція встановлення міжпортових зв'язків DEVS-моделі CWS;
 ST – множина міток станів атомарних DEVS-моделей;
 t – статистичний критерій Ст'юдента;
 ta – функція просування модельного часу;
 $UNCHANGED$ – ключове слово для визначення псевдоподій у специфікації;
 V – множина змінних станів системи переходів;
 X – темпоральний оператор часового зсуву;
 $\delta_{ext}^{MA_i}$ – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MA_i ;
 δ_{ext}^{MC} – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MC ;
 δ_{ext}^{MG} – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MG ;
 $\delta_{int}^{MA_i}$ – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MA_i ;
 δ_{int}^{MC} – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MC ;
 δ_{int}^{MG} – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MG ;
 λ^{MA_i} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MA_i ;
 λ^{MC} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MC ;
 λ^{MG} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MG ;
 ξ_f^s – показник функціональної характеристики CWS при моделюванні;
 ξ_{nf}^s – показник нефункціональної характеристики CWS при моделюванні;
 ξ_f^t – показник функціональної характеристики CWS при тестуванні;
 ξ_{nf}^t – показник нефункціональної характеристики CWS при тестуванні.

ВСТУП

На сьогодні при організації різноманітних бізнес-процесів (у загальному випадку – обчислювальних процесів) інтенсивно використовуються технології створення розподілених програмних систем на основі архітектури SOA. Відповідно до принципів SOA, функціонування таких систем може бути реалізоване шляхом централізованого координування основних компонентів (надалі – сервісів або атомарних сервісів) [1]. Безпосередньо системи прийнято називати композитними сервісами (CWS). Розповсюдженим засобом створення сервісів є технологія JAX-WS [2].

Для перевірки коректності функціонування названих компонентів може бути проведене модульне тестування [3]. Перевірка узгодженості взаємодії сервісів при здійсненні допустимих сценаріїв ОП можлива за рахунок формальної верифікації специфікацій. Зазначені перевірки спрямовані на встановлення відповідності проектованої SOA-системи заданим вимогам. Підтвердження цього шляхом сумісного проведення модульних тестувань та формальної верифікації, однак, не дозволяє формулювати судження відносно задовільності функціонування сис-

теми в реальних умовах. Така потреба виникає у зв'язку із доцільністю врахування при проектуванні також і нефункціональних характеристик сервісів: вартості, часу відгуку, імовірності безвідмовної роботи тощо.

Врахування названих характеристик при проектуванні можливе за рахунок проведення валідації, реалізованої шляхом імітаційного моделювання. Для цього створено багато математичних апаратів. Серед них – формалізм DEVS Б. Зейглера (Bernard P. Zeigler) [4], теорія часових автоматів (ТА) [5], ланцюги Маркова, мережі Петрі та ін. При цьому актуальним, на нашу думку, є залучення одного з таких формалізмів до процесу проектування CWS для зменшення супутніх розробці часових витрат. У зв'язку із цим поняття верифікації та валідації будемо розглядати в роботі як взаємодоповнюючі [6].

Мета роботи – розробка методики валідації CWS, яка дозволяла би здійснювати перевірку придатності такої системи до цільового використання при проектуванні після проведення формальної верифікації.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення сформульованої мети в роботі вирішується задача синтезу імітаційної DEVS-моделі CWS з вихідної формальної TLA-специфікації функціональних характеристик.

Нехай маємо формальну TLA-специфікацію композитного сервісу, який складається із m атомарних сервісів [7]. Представимо таку специфікацію аналітично структурою Кріпке на множині атомарних висловлювань AP [8]:

$$\langle S, \{s_0\}, R, L \rangle, \tag{1}$$

де $s_0 \in S, R \subseteq S^2, L: S \rightarrow 2^{AP}$.

Множину AP при цьому сформуємо із елементів множини $V \times D$, де $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, а $D = \{0, 1, 2\}$: $0 \in D$ – AWS простоє (обчислення ще не почато), $1 \in D$ – AWS функціонує (обчислення виконується), $2 \in D$ – AWS простоє (обчислення завершено).

Тоді вирішувана задача полягає в одержанні на основі структури (1) структури

$$\langle IP, OP, Atomics, set, break \rangle, \tag{2}$$

яка є представленням результуючої складеної DEVS-моделі CWS як засобу валідації [9].

Вирішення поставленої задачі вважатимемо успішним, якщо синтезована DEVS-модель композитного сервісу буде адекватною, а результати валідації на основі цієї моделі – достовірними. За показник достовірності візьмемо близькість результатів валідації шляхом імітаційного моделювання та шляхом тестування. При цьому валідація шляхом моделювання має бути менш витратною за часом.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Темпоральну логіку TLA Л. Лемпорта (Leslie Lamport) обрано у якості формалізму з позицій достатності виразних можливостей та зручності внесення змін до специфікації CWS [10]. Тобто кожний визначений сценарій ОП, що зумовлює відповідну функціональну характеристику CWS, можна подати на основі TLA окремою темпоральною формулою [11].

Вже існують певні спроби сполучення TLA- та DEVS-формалізмів [12]. Вони базуються на твердженні про активну адаптацію науковою спільнотою можливостей TLA з метою верифікації. Акцентується увага, що DEVS-моделі є малопоширеними, проте більш гнучкими та наочними. При цьому обґрунтовується важливість синтезу TLA-специфікації для DEVS-моделей.

У порівнянні із цим, DEVS-модель в нашій роботі розглядається саме як засіб валідації, похідний від TLA-специфікації – засобу верифікації. Обґрунтування доцільності використання названого засобу валідації було здійснене нами раніше [13].

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Визначимо поняття події, що ініціює зміну стану системи переходів (1), тобто спричиняє деякий перехід $(s, s') \in R$, у двох інтерпретаціях: з позиції вихідної формальної TLA-специфікації функціональних характеристик CWS та з позиції результуючої синтезованої DEVS-моделі. У першому випадку – це координуючий вплив на атомарний сервіс у складі CWS з метою просування ОП згідно певного сценарію. У другому випадку – це надходження повідомлення активації моделі AWS на відповідний вхідний порт з метою виконання окремої обчислювальної процедури у межах ОП.

Композитний сервіс розглядатимемо як систему, а атомарний сервіс у його складі – як компонент системи. Розгляд AWS як компонента (а не елемента) зумовлено наявністю в нього інтерфейсу (множини методів або функцій), з якими можна взаємодіяти безпосередньо. Зауважимо, що при організації окремого ОП ми асоціюватимемо із AWS тільки один елемент його інтерфейсу.

Визначення події у двох інтерпретаціях (TLA- та DEVS-контекстах) необхідне для встановлення співвідношення (один до одного) між вхідними та результуючими концептами, відповідно. Визначення події в TLA-контексті розкриває рівень деталізації вихідної специфікації. Це означає, що при верифікації нас не цікавить питання виявлення помилок, пов'язаних із специфікою роботи окремого AWS самого по собі (виокремлено від системи). Це питання, згідно нашого підходу до проектування, має бути вирішене раніше – шляхом модульного тестування, передуючи здійсненню верифікації (рис. 1). Тобто при верифікації вже оперуємо припущенням, що компоненти системи функціонують безвідмовно та безпомилково.

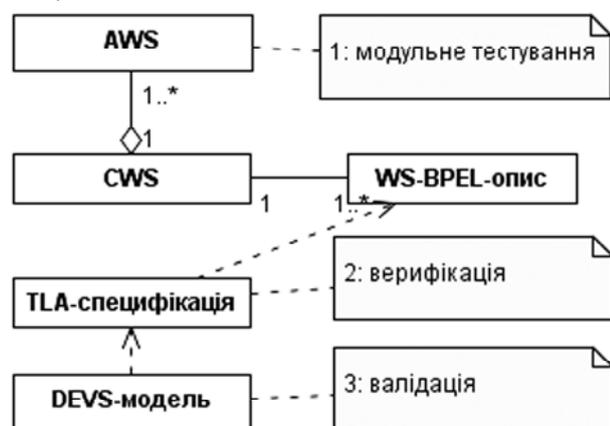


Рисунок 1 – Запропонований підхід до проектування композитних сервісів

На рис. 1 для встановлення зв'язку між сутностями AWS та CWS нами використано відношення агрегації (а не композиції) мови UML. Мета цього – підкреслити автономність атомарного сервісу, який у загальному випадку може входити до складу й інших композитних сервісів. Передумовою до здійснення верифікації є успішність модульного тестування кожного із компонентів системи. Під модулем при цьому розуміється окремий елемент інтерфейсу атомарного сервісу. Певний набір із елементів різних AWS (по одному від кожного) із встановленим порядком виклику методів задається згідно стандарту WS-BPEL [14]. Названий стандарт регламентує взаємодію компонентів композитного сервісу згідно моделі централізованого координування – моделі оркестровки.

Отже, розглядатимемо композитний сервіс як поліморфну сутність, функціональні характеристики якої визначаються наступними факторами – складом задіяних атомарних сервісів, інтерфейсами останніх, а також порядком виклику (координування) елементів інтерфейсів. Зазначені фактори враховуються у TLA-специфікації. Специфікація, у свою чергу, формується з одного або декількох WS-BPEL-описів (рис. 1). Кожний такий опис задає сценарій ОП для одержання відповідної функціональної характеристики системи. Це означає, що TLA-специфікація є формальною моделлю в загальному випадку декількох сценаріїв функціонування CWS [15]. Кожний із сценаріїв характеризується сукупністю темпоральних ознак. Для встановлення цих ознак нами використано темпоральний оператор X . Ознаки представлені у якості подій, що ініціюють продовження функціонування CWS згідно певного сценарію. Події формалізуємо в імплікативній формі, модифікованій оператором [7]:

$$-(v_i = d) \vee X(v_i = d + 1), \quad d = 0, 1; \quad d \in D. \quad (3)$$

Враховуючи специфіку виразних можливостей TLA, події запропонуємо класифікувати на значимі події, псевдоподії та неприпустимі події. Значимі події представлені виразом (3). Вони є засобами формалізації переходів $(s, s') \in R$ структури (1).

Значиму подію охарактеризуємо симетричною різницею

$$L(s) \Delta L(s') = \{(v_i = d), (v_i = d + 1)\} \subseteq AP, \quad (4)$$

де розмітки станів $L(s)$ та $L(s')$ є, відповідно, перед- та постумовами виникнення події.

Потреба фіксації в специфікації також і псевдоподій зумовлена потребою просування модельного часу для DEVS-моделей атомарних сервісів, які при валідації продовжують або функціонувати, або простоювати:

$$-(v_i = d) \vee X(v_i = d), \quad d = 0, 1, 2. \quad (5)$$

Вираз (5) названо нами шаблоном псевдоподії, бо, попри імплікативну форму, він вже не характеризується множиною (4). В (3) $v_i \in V$ змінює своє значення в наступний момент модельного часу, а в (5) – ні.

Наприклад, якщо розглядати сценарій послідовних координуючих впливів на m компонентів CWS (тобто

$|V| = m$), то для просування ОП в формальній моделі кожна значима подія має супроводжуватися $m - 1$ псевдоподією.

Грунтуючись на вищезазначеному, запропонуємо формат представлення концептів значимої події та псевдоподії в TLA-специфікації:

$$(IF Cnd THEN (v'_i := v_i + 1) ELSE (v'_i := v_i)) \wedge \wedge UNCHANGED \langle\langle v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m \rangle\rangle. \quad (6)$$

Верифікація специфікацій на основі конструкцій (6) полягає у виявленні недопустимих подій – подій, що ініціюють недопустимі переходи структури (1):

$$\neg(v_i = d) \vee X(v_i = d - 1), \quad d = 1, 2. \quad (7)$$

Варто відзначити, що події (7) також характеризуються множинами (4). Відмінність їх від подій (3) полягає в наступному: передумови для (3) є постумовами для (7) і навпаки.

За умови, якщо формальну верифікацію специфікації на основі конструкцій (6) здійснено успішно – встановлено, що атомарні сервіси функціонують узгоджено та несуперечливо (коректно), переходимо до валідації (рис. 1). При цьому шляхом імітаційного DEVS-моделювання здійснимо оцінювання показників функціональних характеристик CWS, а також агрегованих значень показників нефункціональних характеристик. Для цього синтезуємо імітаційну DEVS-модель (2), архітектура та поведінка якої визначаються змістом вихідної TLA-специфікації. З цією метою запропонуємо правила синтезу названої моделі:

1) правила синтезу базових моделей AWS (табл. 1);

2) правила синтезу допоміжних базових моделей – моделі клієнта CWS (генератора заявок на обслуговування) та моделі координатора атомарних сервісів у складі CWS – для слідування моделі оркестровки згідно стандарту WS-BPEL (табл. 2);

3) правила синтезу результуючої складеної моделі (2) CWS із залученням базових та допоміжних базових моделей (табл. 3).

Результатом використання правил 1) мають бути m структур

$$MA_i = \langle \{ev\}, \{rs\}, ST, \delta_{ext}^{MA_i}, \delta_{int}^{MA_i}, \lambda^{MA_i}, ta \rangle. \quad (8)$$

Елементи множини $ST = \{st_0, st_1, st_2\}$ структури (8) є представленнями елементів множини D допустимих значень змінних станів, з яких формуються елементи множини літералів AP структури (1). Це означає, що мітка $st_0 \in ST$ – представлення $0 \in D$, $st_1 \in ST$ – $1 \in D$, а $st_2 \in ST$ – $2 \in D$. Базові моделі на основі структур (8) реалізуємо як двопортові:

– вхідний порт – для одержання повідомлення $ev = event_i$, що ініціює однойменну подію активації, від моделі координатора;

– вихідний порт – для відправлення повідомлення-результату обчислень $rs = res_i$ до моделі координатора.

Результатами використання правил 2) мають бути структура

$$MG = \langle \{activate\}, \{job_j\}, ST, \delta_{ext}^{MG}, \delta_{int}^{MG}, \lambda^{MG}, ta \rangle \quad (9)$$

та структура

$$MC = \langle \{job_j\} \cup \{res_i\}, \{event_i\}, ST, \delta_{ext}^{MC}, \delta_{int}^{MC}, \lambda^{MC}, ta \rangle. \quad (10)$$

Результатом використання правил табл. 3 має бути шукана структура (2).

Отже, результуюча DEVS-модель CWS включає m моделей атомарних сервісів, модель клієнта та модель координатора (рис. 2).

Таблиця 1 – Правила синтезу DEVS-моделей атомарних сервісів

Мета		Вихідні TLA-конструкції	Результуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація	значимих подій	на основі (3)	виклик функцій $ta : ST \rightarrow R_{0,\infty}^+$ та: – при $d = 0$ – $\delta_{ext}^{MA_i} : (event_i, st_0, e) \mapsto st_1$; – при $d = 1$ – $\delta_{int}^{MA_i} : st_1 \mapsto st_2$; $\lambda^{MA_i} : st_2 \mapsto res_i$.
	псевдоподій	на основі (5)	виклик функцій $ta : ST \rightarrow R_{0,\infty}^+$.

Таблиця 2 – Правила синтезу DEVS-моделей клієнта та координатора

Мета	Вихідні TLA-конструкції	Результуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація початкового стану	<i>Init</i>	$\delta_{ext}^{MG} : (activate, st_0, e) \mapsto st_1$.
Фіксація ОП	<i>Calc</i>	$\delta_{ext}^{MC} : (job_j, st_0, e) \mapsto st_1, j = 1, 2, \dots, n$.

Таблиця 3 – Правила одержання елементів результуючої DEVS-моделі CWS

Мета	Вихідні TLA-конструкції	Результуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація значимих подій	згідно (3) при $d = 0$	$set : (MC, event_i) \mapsto (MA_i, event_i)$.
	згідно (3) при $d = 1$	$set : (MA_i, res_i) \mapsto (MC, res_i)$.
Фіксація ОП	<i>Calc</i>	$set : (MG, job_j) \mapsto (MC, job_j)$.

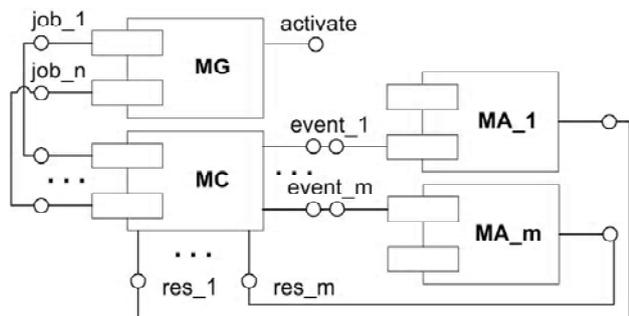


Рисунок 2 – Архітектура синтезованого засобу валідації

Модель, представлена на рис. 2, функціонує наступним чином:

1) на вхідний порт моделі (9) надходить повідомлення активації, що ініціює генерування заявок job_j . Кожна j -а заявка представляє специфікацію окремої функціональної характеристики CWS. Заявки генеруються із заданим законом розподілу;

2) на j -й вхідний порт моделі (10) надходить заявка job_j , що зумовлює $m' \leq m$ повідомлень $event_i$ (оскільки певні AWS за окремого ОП можуть бути зайвими);

3) кожна із m моделей (8) виконує власну частину обчислень згідно j -го ОП. Результати обчислень відправляються до моделі (10) у вигляді повідомлень res_i .

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальні дослідження запропонованої методики здійснено на апаратній платформі наступної конфігурації: частота CPU 3 ГГц, обсяг RAM – 2 ГБ.

Щоб стверджувати відносно достовірності результатів валідації згідно запропонованої методики, а саме – відносно адекватності синтезованої результуючої DEVS-моделі CWS, проведемо експерименти за наступними сценаріями:

1) валідація шляхом тестування – AWS реалізуємо за технологією JAX-WS. Координування здійснимо централізовано – згідно моделі оркестровки. Таку перевірку розглядатимемо як один із завершальних кроків розробки CWS;

2) валідація шляхом моделювання – використаємо результуючу DEVS-модель CWS, синтезовану згідно запропонованих правил, у якості засобу валідації. Така перевірка є завершальним кроком проектування (рис.1).

У першому випадку за вихідні дані візьмемо WS-BPEL-опис CWS, у другому – відповідну формальну TLA-специфікацію. Порівняємо результати валідацій зазначеними шляхами (рис. 3).

На рис. 3 process.bpel – вихідний WS-BPEL-опис; spec.tla – відповідна TLA-специфікація; TLA-to-DEVS – програмна реалізація запропонованих правил синтезу (табл. 1–3); model.java – синтезована результуюча DEVS-модель CWS як засіб валідації; BPEL Engine – програмний засіб (sun-bpel-engine) централізованого координування AWS при валідації шляхом тестування.

Якщо, згідно рис. 3, $\xi_f^t = \xi_f^s$, а $\xi_{nf}^t \approx \xi_{nf}^s$, стверджуємо, що результуюча модель (2) є адекватною, а запропонована методика дозволяє одержувати достовірні

результати валідації при проектуванні CWS. При цьому вважатимемо використання запропонованої методики при проектуванні доцільним, якщо часові витрати на валідацію за сценарієм 2) будуть істотно меншими за часові витрати за сценарієм 1).

У моделі (9) реалізуємо нормальний закон розподілу заявок на обслуговування, що генеруються. DEVS-моделі реалізуємо на мові програмування Java, а моделювання здійснюватимемо у середовищі DEVS Suite.

Вихідні значення для розрахунку часових витрат одержуватимемо як середнє арифметичне 10^2 замірів. У якості нефункціональної характеристики розглядатимемо час відгуку сервісу. Для AWS такі затримки визначимо послідовністю $0, 1 \cdot 10^{-1}, 2 \cdot 10^{-1}, \dots, 5 \cdot 10^{-1}$ с: 0 – компоненти розгорнуто локально, $1 \cdot 10^{-1}$ – вони є рівновіддаленими (значно), $2 \cdot 10^{-1}, \dots, 5 \cdot 10^{-1}$ – окрім територіальної віддаленості моделюються також додаткові затримки, зумовлені інтенсивними обчисленнями. Затримки реалізуємо на основі Java-методу sleep.

Для перевірки методики розглянемо синтетичний сценарій обчислення значення π через арктангенси [16]:

$$\pi = 48 \cdot \arctg\left(\frac{1}{18}\right) + 32 \cdot \arctg\left(\frac{1}{57}\right) - 20 \cdot \arctg\left(\frac{1}{239}\right).$$

Цей вираз розглядатимемо як функціональну характеристику CWS, а значення-результат його обчислення – як шукане значення показника такої характеристики. Вираз також розглядатимемо як аналітичне представлення ОП. Для реалізації характеристики залучимо чотири AWS: три з них – для обчислення арктангенсів, четвертий – для одержання результуючого значення (рис. 4).

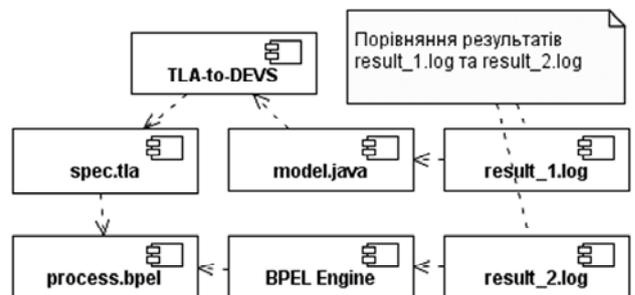


Рисунок 3 – Схема підходу до перевірки методики

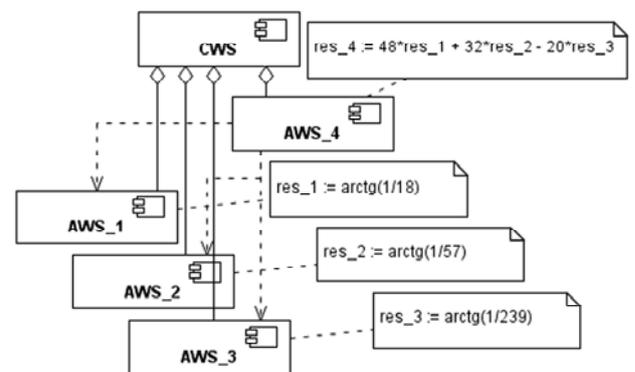


Рисунок 4 – Архітектура композитного сервісу

На рис. 4 res_1 , res_2 та res_3 – часткові результати – артефакти протікання ОП – контейнери показників функціональних характеристик атомарних сервісів AWS_1 , AWS_2 та AWS_3 , відповідно; res_4 – контейнер показника функціональної характеристики атомарного сервісу AWS_4 , який також є показником названої характеристики CWS – контейнером шуканого результату, що залежить від значень res_1 , res_2 та res_3 .

5 РЕЗУЛЬТАТИ

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що на визначеному діапазоні вхідних даних часові витрати на валідацію шляхом моделювання згідно запропонованої методики в середньому у 3,4 рази менші за витрати, пов’язані із валідацією шляхом тестування (рис. 5). Таке зменшення часових витрат нами охарактеризоване як суттєве.

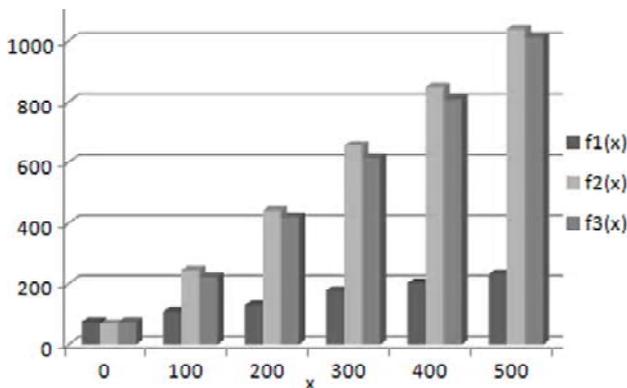


Рисунок 5 – Результати проведених експериментальних досліджень

На рис. 5 значення наведено в мс: x – заданий час відгуку кожного із чотирьох AWS у складі CWS; $f_1(x)$ – часові витрати на моделювання на основі результуючої моделі (2); $f_2(x)$ – оціночні значення показника ξ_{nf}^S ; $f_3(x)$ – фактичні значення показника ξ_{nf}^t . При цьому перевірено рівність $\xi_{nf}^t = \xi_{nf}^S$, що підтвердило коректність запропонованих правил синтезу. Перевірку адекватності результуючої DEVS-моделі CWS здійснено на основі статистичних критеріїв t та F для довірчої імовірності 0,95.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Попри те, що валідація шляхом моделювання згідно запропонованої методики виглядає більш пріоритетно за валідацію шляхом тестування за показником супутніх часових витрат, не менш важливим вбачається питання корисності такої перевірки. Корисність, у свою чергу, варто, на нашу думку, розглядати як певний компроміс за трьома наступними критеріями: адекватність результуючої DEVS-моделі композитному сервісу, достовірність результатів валідації та зменшення часових витрат. Останній критерій набуває особливої значимості у контексті актуальної на сьогодні ітераційної розробки. При цьому нами розглядається доцільність збільшення саме повноти відповідності TLA-специфікацій WS-BPEL-описів сервісу, що, зокрема, підвищить достовірність результатів формальної верифікації. Це, проте, ускладнить як саму запропоновану методику, так і інтеграцію її до процесу проектування.

З позиції ітераційної розробки перспективним може бути використання комбінованого підходу до валідації, за якого, наприклад, на першій та заключній ітераціях здійснюється перевірка шляхом тестування, а на інших – шляхом моделювання. Моделювання дозволить зменшити загальні часові витрати, а тестування – одержати більш достовірні вихідні дані показників нефункціональних характеристик AWS та підтвердити придатність розробленого CWS до цільового використання.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу синтезу імітаційної DEVS-моделі CWS з вихідної формальної TLA-специфікації функціональних характеристик.

Наукова новизна отриманих в роботі результатів полягає в наступному: було запропоновано DEVS-орієнтовану методику валідації CWS, призначену до використання при проектуванні. Це дозволило зменшити супутні валідації часові витрати, що було підтверджено результатами проведених експериментальних досліджень. Вони показали, що на тестовому діапазоні значень нефункціональних характеристик компонентів CWS синтезована результуюча DEVS-модель є адекватною, а правила її одержання – коректними: у порівнянні із валідацією шляхом тестування, валідація шляхом імітаційного моделювання згідно запропонованої методики супроводжувалася зменшенням часових витрат в середньому у 3,4 рази. Таке зменшення охарактеризоване нами як суттєве. Отже, поставлену задачу можна вважати вирішеною.

Практичне значення отриманих результатів полягає в автоматизації процедури валідації CWS при проектуванні згідно запропонованої методики за рахунок програмної реалізації запропонованих правил синтезу DEVS-моделей.

Перспективи подальших досліджень полягають у адаптації запропонованої методики до більш деталізованих вихідних формальних TLA-специфікацій CWS, що, за рахунок поліпшення повноти таких специфікацій, дозволить одержувати більш достовірні результати валідації.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи «Дослідження і розробка методів підвищення ефективності комп’ютерних систем та мереж, пошук шляхів удосконалення навчального процесу» кафедри комп’ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges / [M. P. Papazoglou, P. Traverso, S. Dustdar, F. Leymann] // IEEE Computer. – 2007. – Vol. 40, No. 11. – P. 38–45. DOI: 10.1109/MC.2007.400.
- 2 Vohra D. Java 7 JAX-WS Web Services: A practical, focused mini book for creating Web Services in Java 7 / D. Vohra. – Birmingham-Mumbai: Packt Publishing Ltd., 2012. – 64 p.
- 3 Freeman S. Growing Object-Oriented Software, Guided by Tests / S. Freeman, N. Pryce. – New York : Addison-Wesley, 2010. – 384 p.
- 4 Wainer G. A. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications / G. A. Wainer, P. J. Mosterman. – New York : CRC Press, 2010. – 534 p.

5. Kindermann R. Beyond Lassos: Complete SMT-Based Bounded Model Checking for Timed Automata / R. Kindermann, T. Junttila, I. Niemela // Lecture Notes in Computer Science. Formal Techniques for Distributed Systems. – 2012. – Vol. 7273. – P. 84–100. DOI: 10.1007/978-3-642-30793-5_6.
6. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2005, IDT) : ДСТУ ISO 9000:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України. – 29 с. – (Національний стандарт України).
7. Шкарупило В. В. Модель TLA-спецификации композитного веб-сервиса с множеством динамик / В. В. Шкарупило // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2013. – № 1. – С. 94–100. DOI: 10.15588/1607-3274-2013-1-15.
8. Карпов Ю. Г. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем / Ю. Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
9. Шкарупило В. В. DEVS-модель как средство валидации композитных веб-сервисов распределенной системы / В. В. Шкарупило, С. Ю. Скрупский, Р. К. Кудерметов // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2011. – № 7. – С. 61–67.
10. Lamport L. Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers / L. Lamport. – Boston: Addison-Wesley, 2002. – 364 p.
11. Шкарупило В. В. WS-BPEL-модификация метода TLC-верификации / В. В. Шкарупило // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: НВП «Технологічний центр», 2013. – № 4/2 (64). – С. 23–28.
12. Cristia M. A TLA+ Encoding of DEVS Models / M. Cristia // Proc. Int. Modeling and Simulation Multiconference (Buenos Aires, Argentina, February 8–10, 2007). – P. 17–22.
13. Шкарупило В. В. Сравнительный анализ подходов к реализации процесса автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: ЧНУ, 2011. – Т. 2, № 4. – С. 80–85.
14. Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 [Electronic resource] : OASIS Standard, April 11, 2007. – Access mode: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>. – Title from screen.
15. Шкарупило В. В. Концептуальная модель процесса автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов, Т. А. Паромова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – № 15 (203). – С. 231–238.
16. Шкарупило В. В. Методика автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов // Інформатика і комп'ютерні технології : VII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 22–23 листопада 2011 р. : тези доп. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 382–384.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014.
Після доробки 23.02.2015.

Шкарупило В. В.¹, Кудерметов Р. К.², Польская О. В.³

¹Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

³Старший преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

DEVS-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ВАЛИДАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ ВЕБ-СЕРВИСОВ

Предложена методика валидации композитных веб-сервисов путем синтеза имитационных дискретно-событийных моделей на основе формализма DEVS. Это позволяет осуществлять автоматизированную проверку пригодности таких систем к целевому использованию при проектировании путем имитационного моделирования. В качестве входных данных использована формальная спецификация на основе темпоральной логики TLA, что позволяет математически строго представлять функциональные характеристики композитных сервисов в формате вычислительных процессов. В качестве аналитической модели в основе TLA-спецификации взята структура Крипке. В рамках методики предложены правила синтеза из исходной TLA-спецификации DEVS-модели композитного сервиса, предназначенной быть средством валидации. Результирующая DEVS-модель состоит из моделей атомарных сервисов, модели клиента композитного сервиса и модели координатора атомарных сервисов, функционирующего согласно спецификации WS-BPEL.

Для проверки методики проведены экспериментальные исследования, подтвердившие адекватность результирующей DEVS-модели. Проверка выполнена согласно предложенному подходу, состоящему в сравнении результатов валидации путем имитационного моделирования с результатами валидации путем тестирования. По результатам проведенных исследований обоснована целесообразность использования предложенной методики при проектировании композитных сервисов, которая заключается в уменьшении временных затрат на валидацию. Акцентируется внимание на уместности использования методики при итерационной разработке.

Ключевые слова: SOA, WS-BPEL, композитный веб-сервис, спецификация, верификация, валидация, TLA, DEVS.

Shkarupylo V. V.¹, Kudermetov R. K.², Polska O. V.³

¹PhD, Senior Lecturer of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Head of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³Senior Lecturer of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

DEVS-ORIENTED TECHNIQUE FOR COMPOSITE WEB SERVICES VALIDITY CHECKING

A technique for Composite Web Services validity checking has been proposed. It is based on discrete-event DEVS-models synthesis, which provides the ability to conduct the automated validation by way of simulation during the design process. Temporal Logic of Actions has been chosen as the basis for input data – formal specification of Composite Web Service. It allows to specify the functional properties of such systems mathematically strictly. Functional properties has been represented as computational processes. The Kripke structure has been used as TLA-specification analytical model. Our technique leans on the proposed rules, aimed at simulation DEVS-model synthesis from given TLA-specification. The resulting coupled Composite Web Service DEVS-model consists of atomic web services models, model of client, simulated as job-requests generator, and coordinator model. Coordinator represents the WS-BPEL-engine, functioning in accordance with centralized orchestration model.

A case study has been conducted to verify the proposed technique. Its artifacts confirmed the adequacy of resulting DEVS-model. The technique verification is based on the proposed approach: simulation-driven validation results are compared with the ones, obtained with test-driven validation. Technique expediency has been grounded by Composite Web Services validity checking time costs reduction.

Keywords: SOA, WS-BPEL, Composite Web Service, Specification, Verification, Validation, TLA, DEVS.

REFERENCES

- Papazoglou M. P., Traverso P., Dustdar S., Leymann F. Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Computer*, 2007, Vol. 40, No. 11, P. 38–45. DOI: 10.1109/MC.2007.400.
- Vohra D. Java 7 JAX-WS Web Services: A practical, focused mini book for creating Web Services in Java 7. Birmingham-Mumbai, Packt Publishing Ltd., 2012, 64 p.
- Freeman S., Pryce N. Growing Object-Oriented Software, Guided by Tests. New York, Addison-Wesley, 2010, 384 p.
- Wainer G. A., Mosterman P. J. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications. New York, CRC Press, 2010, 534 p.
- Kindermann R., Junttila T., Niemela I. Beyond Lassos: Complete SMT-Based Bounded Model Checking for Timed Automata, *Lecture Notes in Computer Science. Formal Techniques for Distributed Systems*, 2012, Vol. 7273, pp. 84–100. DOI: 10.1007/978-3-642-30793-5_6.
- Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv (ISO 9000:2005, IDT) : DSTU ISO 9000:2007. [Chynnyi vid 2008-01-01]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 29 p. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
- Shkarupylo V. V. Model' TLA-spezifkacii kompozitnogo veb-servisa s mnozhestvom dinamik, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2013, No. 1, pp. 94–100. DOI: 10.15588/1607-3274-2013-1-15.
- Karpov Yu. G. MODEL CHECKING. Verifikaciya parallel'nyx i raspredelennyx programmnyx sistem. Sankt-Peterburg, BXV-Peterburg, 2010, 560 p.
- Shkarupylo V. V., Skrupskiy S. Iu., Kudermetov R. K. DEVS-model' kak sredstvo validacii kompozitnyx veb-servisov raspredelennoj sistemy, *Kompiuterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 2011, No. 7, pp. 61–67.
- Lampert L. Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers. Boston, Addison-Wesley, 2002, 364 p.
- Shkarupylo V. V. WS-BPEL-modifikaciya metoda TLC-verifikacii, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv, NVP «Tekhnolohichniy tsentr», 2013, No. 4/2 (64), pp. 23–28.
- Cristia M. ATLA+ Encoding of DEVS Models, *Proc. Int. Modeling and Simulation Multiconference (Buenos Aires, Argentina, February 8–10, 2007)*, pp. 17–22.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K. Sravnitel'nyj analiz podxodov k realizacii processa avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu imeni Yuriia Fedkovycha. Seriya: kompiuterni systemy ta komponenty*. Chernivtsi, ChNU, 2011, Vol. 2, No. 4, pp. 80–85.
- Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 [Electronic resource] : OASIS Standard, April 11, 2007. Access mode: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>. Title from screen.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K., Paromova T. A. Konceptual'naya model' processa avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika*. Donetsk, DonNTU, 2012, No. 15 (203), pp. 231–238.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K. Metodika avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Informatyka i kompiuterni tekhnologii : VII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh, 22–23 lystopada 2011 r. : tezy dop.* Donetsk, DonNTU, 2011, Vol. 1, pp. 382–384.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.5.013

Дорофеев Ю. И.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

ДЕСКРИПТОРНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ОГРАНИЧЕННОГО РОБАСТНОГО ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА

Решена задача синтеза робастного гарантирующего управления запасами для сетей поставок с параметрической структурной неопределенностью в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и наличия несимметричных ограничений на значения состояний и управлений. Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Для подавления влияния внешних возмущений, моделирующих изменения спроса, одновременно с обеспечением робастной устойчивости замкнутой системы применен метод инвариантных эллипсоидов, который был усовершенствован посредством использования дескрипторного описания системы и построения параметризованной функции Ляпунова, что позволяет уменьшить степень влияния неопределенности значений транспортных запаздываний на результат синтеза управления. С помощью математического аппарата линейных матричных неравенств задача синтеза управления представлена в виде последовательности задач полуопределенного программирования, для решения которых применяются свободно распространяемые специализированные программные пакеты. В рамках предложенной методики возможен выбор оптимальных значений страховых запасов ресурсов, поскольку рассмотренное решение задает, фактически, алгоритмическую зависимость между уровнем страховых запасов и оптимальным значением критерия качества. Рассмотрен численный пример.

Ключевые слова: управление запасами, робастное управление, метод инвариантных эллипсоидов, дескрипторный подход, параметризованная функция Ляпунова, линейное матричное неравенство.

НОМЕНКЛАТУРА

«+» – псевдообращение Мура-Пенроуза;
 $0_{n \times n}$ – нулевая матрица соответствующей размерности;
 A – матрица динамики расширенной модели сети поставок;
 B – матрица влияния управлений расширенной модели сети поставок;
 B_t – матрицы влияния управлений исходной модели сети поставок;
 C – матрица выходов расширенной модели сети поставок;
 D – множество допустимых значений внешних возмущений;
 E – матрица влияния возмущений исходной модели сети поставок;
 G – матрица влияния возмущений расширенной модели сети поставок;
 I_n – единичная матрица соответствующей размерности;

$K(k)$ – нестационарная матрица коэффициентов обратной связи;
 U – множество допустимых значений управляющих воздействий;
 W_ξ – положительно определенная диагональная весовая матрица критерия качества;
 W_u – положительно определенная диагональная весовая матрица критерия качества;
 X – множество допустимых значений состояний;
 d^{\max} – вектор верхних граничных значений внешнего спроса;
 d^{\min} – вектор нижних граничных значений внешнего спроса;
 $d(k)$ – вектор внешних возмущающих воздействий;
 k – номер дискретного интервала времени;
 m – размерность вектора управляющих воздействий;
 n – количество узлов сети поставок;

u^{\max} – вектор граничных значений управляющих воздействий;

$u(k)$ – вектор управляющих воздействий;

q – размерность вектора внешних возмущений;

r – количество узлов сети, интервалы запаздывания которых варьируются;

x^{\max} – вектор граничных значений состояний;

$x(k)$ – вектор состояний исходной модели сети поставок;

ε – малая положительная константа;

$\xi(k)$ – вектор состояний расширенной модели сети поставок;

Δ – максимальное значение интервалов запаздывания материальных потоков в сети;

ЛМН – линейное матричное неравенство;

ПФЛ – параметризованная функция Ляпунова.

ВВЕДЕНИЕ

Задача управления запасами возникает в системах производства-хранения-распределения ресурсов, когда с целью удовлетворения потребительского спроса создаются запасы материальных ресурсов. Примерами могут служить производственные, транспортные системы, системы распределения ресурсов (воды, электроэнергии) и т.п., в состав которых входят поставщики сырья, производственные узлы, хранилища ресурсов и продавцы конечной продукции, тогда как потребители, формирующие заказы на поставку ресурсов, рассматриваются в качестве источников внешних возмущений. Существуют различные типы топологии подобных систем, которые определяются взаимным размещением производственных звеньев, промежуточных складов и потребителей. Если некоторые виды сырья или полуфабрикатов используются в нескольких процессах, проходящих одновременно, система приобретает эшелонированную структуру, вследствие чего рассматриваемые системы называют сетями поставок.

Предполагается, что каждый узел сети поставок в реальном времени принимает заказы от узлов, являющихся потребителями его продукции, а также от внешних потребителей, и формирует заказы узлам, которые являются для него поставщиками ресурсов. Управление запасами заключается в определении моментов времени и размеров заказов на их восполнение. Выбор стратегии управления запасами определяется характером внешнего спроса. На практике зачастую нет оснований для того, чтобы рассматривать спрос в качестве случайных, либо гармонических, либо убывающих с течением времени внешних возмущений – какая-либо дополнительная информация, кроме той, что внешний спрос является ограниченным, отсутствует.

Спецификой задачи управления запасами является наличие запаздываний по управлению, обусловленных задержками в пополнении запасов относительно моментов формирования заказов. В процессе функционирования сети поставок величины запаздываний могут отличаться от своих номинальных значений. В результате возникает необходимость обеспечения робастности системы управления запасами относительно возможных вариаций значений внешнего спроса и величин запаздывания.

Другой особенностью рассматриваемой задачи является необходимость учета структурных ограничений на объемы хранилищ и размеры заказов. В теории управления традиционно рассматривают ограничения, заданные в какой-либо норме. Однако, для задач управления запасами характерно требование неотрицательности значений переменных, что приводит к необходимости учета несимметричных ограничений на значения управляющих воздействий и состояний.

Одним из наиболее распространенных подходов к синтезу ограниченного стабилизирующего управления является построение квадратичной функции Ляпунова и использование математического аппарата ЛМН. Основным недостатком такого подхода является консерватизм полученных результатов [1], который проявляется в том, что с практической точки зрения получаемые границы робастности оказываются неоправданно заниженными. Причиной является использование единой функции Ляпунова для всех возможных вариантов реализации неопределенности модели системы и внешних воздействий.

Для уменьшения степени консерватизма используют параметризованную функцию Ляпунова. Однако, при этом полученные ЛМН содержат произведение нестационарной матрицы динамики системы на матрицу, которая участвует в построении функции Ляпунова. Для преодоления указанного недостатка применяется дескрипторный подход, который позволяет добиться разделения матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, что ведет к существенному уменьшению степени консерватизма результатов синтеза управления.

Целью работы является синтез робастной стратегии управления запасами гарантированной стоимости, которая строится на основе дескрипторного подхода и может использоваться для определения в каждый момент времени размеров заказа ресурсов с учетом несимметричных ограничений на их значения в виде функции от уровня запаса ресурсов в узлах системы, которые позволяют удерживать состояния в ограниченном компактном множестве при любых допустимых возмущениях.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для математического описания управляемой сети поставок используется дискретная модель в пространстве состояний, уравнения которой описывают изменение уровня запасов каждого вида ресурсов с течением времени. В качестве переменных состояний рассматриваются наличные уровни запаса ресурсов. Управляющими воздействиями являются размеры заказов на поставку ресурсов, формируемые узлами в текущем периоде. Размеры спроса на ресурсы, поступающие из внешней среды, выступают в качестве внешних возмущений.

Для описания запаздываний используется модель дискретной задержки, поскольку предполагается, что номинальные значения длительности транспортировки и переработки ресурсов известны и кратны некоторому периоду дискретизации. Также предполагается, что структура сети известна, а состояния доступны непосредственному измерению. Тогда математическая модель сети поставок задается разностным уравнением с запаздыванием:

$$x(k+1) = x(k) + \sum_{t=0}^{\Delta} B_t u(k-t) + E d(k). \quad (1)$$

Предполагается, что для каждого узла сети заданы максимально допустимые уровни запаса ресурсов и максимальные размеры заказов. Тогда в процессе функционирования системы должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} x(k) &\in X = \{x \in \mathbb{R}^n : 0 \leq x \leq x^{\max}\}, \\ u(k) &\in U = \{u \in \mathbb{R}^m : 0 \leq u \leq u^{\max}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Будем предполагать, что внешние возмущения удовлетворяют ограничениям:

$$d(k) \in D = \{d \in \mathbb{R}^q : 0 \leq d^{\min} \leq d \leq d^{\max}\}.$$

Выполним преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздывания на основе расширения вектора состояний [2] путем включения в него векторов, определяющих размеры ранее заказанных ресурсов, находящихся в процессе транспортировки и переработки:

$\xi(k) = [x^T(k), u^T(k-1), u^T(k-2), \dots, u^T(k-\Lambda)]^T$. Тогда уравнения расширенной модели примут вид:

$$\xi(k+1) = A\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \quad x(k) = C\xi(k), \quad (3)$$

где матрицы $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $B \in \mathbb{R}^{N \times m}$, $G \in \mathbb{R}^{N \times q}$, $C \in \mathbb{R}^{n \times N}$, $N = n + m\Lambda$ имеют соответствующую блочную структуру [3].

Рассмотрим построение матрицы динамики A расширенной модели в том случае, когда величины запаздывания управляемых потоков Λ_i , $i = \overline{1, n}$ отличаются от своих номинальных значений. В этом случае матрица становится нестационарной и в каждый момент времени $k \geq 0$ может принимать какое-либо значение из множества

$$A(\theta) = \left\{ A \in \mathbb{R}^{N \times N} : A = A_0 + \sum_{i=1}^L \theta_i(k) A^{(i)}, \theta(k) \in \Theta \right\}, \quad (4)$$

где $L = 2^r$; $\theta_i(k)$, $i = \overline{1, L}$ – набор параметров, которые описывают структурную неопределенность модели и удовлетворяют следующим требованиям:

$$\Theta = \left\{ \theta \in \mathbb{R}^L : \theta_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^L \theta_i(k) = 1 \right\}. \quad (5)$$

Таким образом, модель сети в условиях неопределенности значений запаздывания управляемых потоков может рассматриваться как выпуклый многогранник, который задается списком вершин $\left\{ (A^{(1)}, B, G, C), (A^{(2)}, B, G, C), \dots, (A^{(L)}, B, G, C) \right\}$, и может быть представлена в виде модели с параметрической структурной неопределенностью следующего вида:

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A(\theta) \in \Omega = \text{Co}\{A^{(1)}, \dots, A^{(L)}\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\text{Co}\{\cdot\}$ – выпуклая оболочка; $A^{(i)}$, $i = \overline{1, L}$ – i -я вершина выпуклого множества Ω .

Запишем критерий качества в случае бесконечного временного горизонта в виде:

$$J_\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \left((\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u^T(k) W_u u(k) \right), \quad (7)$$

где $0 \prec W_\xi \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $0 \prec W_u \in \mathbb{R}^{m \times m}$; $\xi^* = [x^{*\Gamma}, \dots, x^{*\Gamma}]^T_{\Lambda+1}$ –

составной вектор, у которого компоненты вектора x^* определяют размеры страховых запасов ресурсов в узлах сети и вычисляются на основании верхних граничных значений внешнего спроса с учетом запаздываний и продуктивной модели Леонтьева:

$$x^* = (I_n - \Pi)^{-1} \hat{d}, \quad \hat{d}_i = \begin{cases} \Lambda_i d_i^{\max}, & i = \overline{1, q}, \\ 0, & i = q+1, n, \end{cases} \quad (8)$$

где $\Pi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – продуктивная матрица, значение элемента Π_{ij} которой равно количеству единиц ресурса i , необходимому для производства единицы ресурса j .

Первое слагаемое в выражении (7) определяет размеры штрафов за отклонение текущих уровней запаса ресурсов от страховых, второе – стоимость производства и транспортировки ресурсов.

Для системы (6) с параметрической неопределенностью (4), (5) рассматривается задача синтеза робастной стратегии управления запасами, которая для любого допустимого спроса $d(k) \in D \quad \forall k \geq 0$ обеспечивает:

- 1) полное и своевременное удовлетворение спроса, то есть выполнение первого из ограничений (2) на значения состояний;
- 2) робастную устойчивость замкнутой системы при ограничениях (2) на значения управлений;
- 3) гарантированную стоимость управления, которая означает, что значение критерия качества (7) не превысит некоторого граничного значения.

В качестве дополнительного условия выдвигается требование снижения степени влияния изменений неопределенного вектора параметров $\theta(k)$ на результат синтеза управления.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ различных подходов к управлению запасами можно найти в работе [4] и обширной библиографии к ней. Среди многообразия моделей управления запасами выделяют два основных типа: модель критических уровней и модель периодической проверки. В первом случае предполагается непрерывный контроль за состоянием запасов и размещение заказов фиксированного размера при снижении текущих запасов до некоторых критических уровней. Второй тип модели предполагает проверку уровня запасов через равные промежутки времени и размещение заказа, размер которого определяется в соответствии с выбранной стратегией.

В данной работе рассматривается модель периодической проверки, а задача управления запасами сформулирована как задача подавления влияния неслучайных ограниченных внешних возмущений, методы решения которой рассмотрены в работе [5].

Одним из подходов к данной проблематике в теории робастного управления является концепция инвариантных множеств [6]. Среди различных форм инвариантных множеств особо выделяются эллипсоиды вследствие их

простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова. При этом для синтеза оптимального регулятора требуется решить эквивалентную задачу поиска наименьшего по некоторому критерию инвариантного эллипсоида замкнутой динамической системы. В работе [5] на основе техники ЛМН устанавливается достаточное условие устойчивости замкнутой системы – это существование квадратичной функции Ляпунова, построенной на решениях системы.

После того, как были развиты вычислительные методы, основанные на идеях выпуклой оптимизации, и для их реализации были разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение [7], техника ЛМН используется в качестве общего метода анализа и синтеза динамических систем как в непрерывном, так и в дискретном времени. Однако, применение указанного подхода приводит к консервативным результатам. Это означает, что максимально допустимая величина неопределенности, при которой сохраняется робастность системы, определяется наихудшим элементом семейства. Иными словами, подход рассчитан на наихудшую возможную неопределенность, реализация которой на практике может быть крайне маловероятной.

Для преодоления указанного недостатка предлагается использовать так называемую ПФЛ (см., например, [8]). Исследования показали, что условия устойчивости, полученные на основе ПФЛ являются менее консервативными, чем те, при получении которых использовалась функции Ляпунова, не зависящая от параметра. Необходимо отметить, что большинство работ, авторы которых используют ПФЛ, посвящены анализу и синтезу динамических систем в непрерывном времени. Среди работ, в которых предлагается применять ПФЛ для систем в дискретном времени, следует отметить [9].

В настоящее время подход на основе использования ПФЛ стал мощным инструментом для анализа и синтеза линейных систем с неопределенностью различного рода. В работе [10] предложено расширение указанного подхода на основе дескрипторного описания системы, которое первоначально было предложено для исследования устойчивости и синтеза управления в системах с запаздыванием. Дескрипторный подход обладает двумя основными преимуществами: во-первых, введение дополнительных ослабляющих переменных позволяет значительно уменьшить консерватизм результатов; во-вторых, подход может быть применен не только для анализа устойчивости систем с неопределенностью, заданной в виде многогранника, но и для решения задачи синтеза оптимального регулятора.

Однако, полученные результаты напрямую неприменимы к задаче управления запасами в сетях поставок, поскольку рассматриваемая модель системы не содержит внешних возмущений, авторы не учитывают ограничения на значения состояний и управлений, а также не вводят критерий качества, позволяющий оценить стоимость полученного управления.

В результате возникает необходимость расширения метода инвариантных эллипсоидов для задач управления запасами на основе дескрипторного подхода с использованием параметризованной функции Ляпунова.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполним аппроксимацию множества D значений внешнего спроса эллипсоидом наименьшего объема, который задается уравнением

$$E(d^*, Q_d) = \left\{ d \in \mathbb{R}^q : (d(k) - d^*)^T Q_d^{-1} (d(k) - d^*) \leq 1 \right\} \quad (9)$$

Матрица $Q_d \in \mathbb{R}^{q \times q}$ и вектор $d^* \in \mathbb{R}^q$ координат центра эллипсоида определяются в результате решения задачи полуопределенного программирования аналогично тому, как это сделано в работе [11].

Будем строить закон управления в виде линейной динамической обратной связи по сигналу рассогласования между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов

$$u(k) = K(k) (\xi(k) - \xi^*). \quad (10)$$

Тогда расширенную модель замкнутой системы для управления (10) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A_f(k, \theta) (\xi(k) - \xi^*) + A(\theta) \xi^* + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A_f(k, \theta) = A(\theta) + BK(k), \quad A(\theta) \in \Omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Задача синтеза управления эквивалентна решению минимаксной задачи

$$u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} \left(\max_{d(k) \in E(d^*, Q_d), A(\theta) \in \Omega} J_\infty(k) \right). \quad (12)$$

Выполним преобразование системы (6) с помощью дескрипторной системы следующего вида

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_N & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_N \\ A(\theta) & -I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ B \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ G \end{bmatrix} d(k). \end{aligned} \quad (13)$$

Пусть

$$P(k, \theta) = \begin{bmatrix} P_1(k, \theta) & 0_{N \times N} \\ P_2(k) & P_3(k) \end{bmatrix},$$

где $P_i \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $i = 1, 2, 3$, $P_1(k, \theta)$ – аффинная функция от вектора параметров θ такая, что $P_1(k, \theta) = P_1^T(k, \theta) = \sum_{i=1}^L \theta_i P_{1i}(k)$, $P_{1i}(k) \succ 0$, $i = \overline{1, L}$, $P_3(k) = P_3^T(k)$.

Определим модифицированную параметризованную функцию Ляпунова, которая построена на решениях системы (11), в следующем виде

$$V(\xi(k) - \xi^*, \theta) = (\xi(k) - \xi^*)^T P_1(k, \theta) (\xi(k) - \xi^*). \quad (14)$$

Динамическая система (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) является робастно устойчивой, если $V(\xi(k) - \xi^*, \theta) > 0$ и $\Delta V(\xi(k) - \xi^*, \theta) = V(\xi(k+1) - \xi^*, \theta) - V(\xi(k) - \xi^*, \theta) < 0 \quad \forall \theta \in \Theta$ при $(\xi(k) - \xi^*) \neq 0$.

Введем обозначения $E = \begin{bmatrix} I_N & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix}$,

$$\bar{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_N \\ A(\theta) & -I_N \end{bmatrix}, \quad \tilde{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ A(\theta) - I_N \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ B \end{bmatrix},$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ G \end{bmatrix}, \quad \bar{\xi}(k) = \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix}, \quad \bar{\xi}^* = \begin{bmatrix} \xi^* \\ \xi^* \end{bmatrix}.$$

Вычислим первую по k разность ПФЛ (14) в силу системы (11) с учетом преобразования (13):

$$\begin{aligned} \Delta V(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*, \theta) &= (\xi(k+1) - \xi^*)^T P_1(k, \theta) (\xi(k+1) - \xi^*) - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} \xi(k+1) - \xi^* \\ 0_{N \times 1} \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \begin{bmatrix} \xi(k+1) - \xi^* \\ 0_{N \times 1} \end{bmatrix} - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) \end{bmatrix} - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)(\xi(k) - \xi^*) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) + \xi^* + (A(\theta) - I_N)\xi^* \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)(\xi(k) - \xi^*) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) + \xi^* + (A(\theta) - I_N)\xi^* \end{bmatrix} - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \frac{1}{2} \left[(\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*)^T (P(k, \theta) + P^T(k, \theta)) \times \right. \\ &\quad \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ &\quad \left. - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta) E^T (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \right] \\ &\quad \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta) E^T (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \Big]. \end{aligned}$$

Потребуем, чтобы значение ПФЛ (14) с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, которая определяется значением показателя качества (7):

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \left[(\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*)^T (P(k, \theta) + P^T(k, \theta)) \times \right. \\ &\quad \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ &\quad \left. - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta) E^T (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \right] \leq \\ &\leq - \left((\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u^T(k) W_u u(k) \right). \end{aligned}$$

Если последнее неравенство выполняется, то можно показать, что ПФЛ (14) $\forall k \geq 0$ определяет верхнее граничное значение критерия качества (7):

$$\max_{d(k) \in E(d^*, Q_d), A(\theta) \in \Omega} J_\infty(k) \leq V(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*, \theta).$$

Тогда задача (12) эквивалентна задаче минимизации ПФЛ (14) $u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} V(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*, \theta)$, для решения

которой применим метод инвариантных эллипсоидов [4]. Кратко изложим идеи метода.

Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E(\xi^*, Q(k, \theta)) = \left\{ \xi \in \mathbb{R}^N : (\xi(k) - \xi^*)^T Q^{-1}(k, \theta) (\xi(k) - \xi^*) \leq 1 \right\}, \quad (15)$$

называется инвариантным по состоянию для системы (11), если из условия $\xi(0) \in E(\xi^*, Q(0, \theta))$ следует, что $\xi(k) \in E(\xi^*, Q(k, \theta)) \forall k \geq 0$. Другими словами, любая траектория системы, начавшись в инвариантном эллипсоиде, остается в нем для любого момента времени $k \geq 0$.

Эллипсоид (15) может рассматриваться в качестве аппроксимации множества достижимости замкнутой системы (11), то есть позволяет характеризовать влияние внешних возмущений и неопределенности параметров модели на траекторию замкнутой системы. Тогда минимизация в некотором смысле инвариантного эллипсоида (15) соответствует робастному управлению системой (11).

Сравнение выражений (14) и (15) позволяет сделать вывод, что если выполняется тождество $P_1(k, \theta) = Q^{-1}(k, \theta)$, то эллипсоид (15) представляет собой множество, находящееся внутри поверхности уровня ПФЛ (14).

Тогда задача робастной стабилизации заключается в вычислении в каждый момент времени $k \geq 0$ матрицы $K(k)$ такой, чтобы регулятор (10) обеспечивал минимизацию по некоторому критерию эллипсоида (15) при ограничениях (2). Выберем в качестве критерия сумму квадратов полуосей эллипсоида, то есть след матрицы $Q(k, \theta)$. Тогда целевая функция оптимизационной задачи будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^L \text{trace} \left(P_i^{-1}(k) \right) \rightarrow \min, \quad (16)$$

то есть является нелинейной. Однако, задача (16) эквивалентна следующей задаче:

$$\sum_{i=1}^L \text{trace} \left(H_i(k) \right) \rightarrow \min \quad (17)$$

при ограничениях $\begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad H_i(k) \succ 0,$

$H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}, \quad i = \overline{1, L}.$

Указанная эквивалентность доказывается с помощью неравенств $H_i(k) \succeq P_i(k), \quad i = \overline{1, L}$ и леммы Шура [8].

Тогда результат решения задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами в сетях поставок на основе параметризованной функции Ляпунова с помощью дескрипторного подхода может быть представлен в виде следующей теоремы.

Теорема. Рассмотрим систему (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) и ограничениями (2), и пусть матрицы $\hat{S}(k)$ и $\hat{Y}(k)$ получены в результате решения оптимизационной задачи (17) при ограничениях

на матричные переменные $P_i(k) = P_i^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $i = \overline{1, L}$, $P_2(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $S(k) \in \mathbb{R}^{m \times m}$; $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$; $Z^{(ii)} \in \mathbb{R}^{(7N+3q+m) \times (7N+3q+m)}$, $i = \overline{1, L}$; $Z^{(ij)} = Z^{(ji)T}$, $i = \overline{1, L-1}$, $j = i+1, L$ и скалярный параметр $\alpha(k)$

$$\begin{bmatrix} Z^{(11)} & Z^{(12)} & \dots & Z^{(1L)} \\ Z^{(21)} & Z^{(22)} & \dots & Z^{(2L)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z^{(L1)} & Z^{(L2)} & \dots & Z^{(LL)} \end{bmatrix} \preceq 0,$$

$$\alpha(k) > 0, \quad \begin{bmatrix} P_2(k)BB^T & BS(k) \\ S^T(k)B^T & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (18)$$

$$P_i(k) \succ 0, \quad H_i(k) \succ 0, \quad \begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0,$$

$$\begin{bmatrix} Q_x & C \\ C^T & P_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, L}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} Y^T(k)\varepsilon e_m (\xi(k) - \xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \preceq 0,$$

$$\begin{bmatrix} Y^T(k)u^{\max} (\xi(k) - \xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (20)$$

где $Q_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица эллипсоида наименьшего объема, который аппроксимирует множество X ; $e_m = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$;

Если задача минимизации линейной функции (17) при ограничениях (18)–(20), которая является задачей полуопределенного программирования, имеет решение, то: 1) для любого начального состояния $x(0) \geq x^{\max}$, $u(k) = 0_{m \times 1} \forall k \leq 0$ и $\forall A(\theta) \in \Omega$, а также внешнего возмущения $d(k) \in E(d^*, Q_d)$ система (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) является робастно устойчивой при ограничениях (2); 2) среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей

$$K(k) = \hat{S}^{-1}(k)\hat{Y}(k) \quad (21)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантного эллипсоида (15) для замкнутой системы (11) в момент времени k .

Из-за ограниченности объема статьи доказательство теоремы опускаем.

Первое из ЛМН (18) гарантирует стабилизацию замкнутой системы (11) при $\forall d(k) \in E(d^*, Q_d)$ и $\forall A(\theta) \in \Omega$. Последнее из ЛМН (19), а также ЛМН (20) обеспечивают выполнение заданных ограничений (2). Отметим, что именно наличие ЛМН (20) приводит к необходимости использования нестационарной обратной связи, поскольку матрицы неравенств зависят от текущего значения вектора состояния $\xi(k)$.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве примера рассмотрим сеть поставок, которая изучалась в работе [2]. Модель сети описывается графом $G = (\{1, 2, 3\}, \{(2, 1), (2, 3), (3, 1)\})$. Заданы значения времени выполнения заказа в узлах сети: $T_1 = T_2 = 2$, $T_3 = 1$; и времени транспортировки ресурсов между узлами сети: $T_{2,1} = T_{3,1} = T_{2,3} = 1$.

Представим управляемые потоки u_1 и u_3 , описывающие сборочные процессы, в виде гипердуг, а также добавим поток u_2 , который описывает поставки сырья извне (см. рис. 1). Дуги d_1 и d_2 , изображенные пунктирными линиями, представляют внешний спрос. Значение времени транспортировки и количество единиц продук-

$$Z^{(ij)} = \begin{bmatrix} -P_i(k) & A^{(i)T}P_2(k) + Y^T(k)B^T & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & A^{(i)T}P_2(k) + Y^T(k)B^T & 0_{N \times q} & W_\xi & Y^T(k)W_u \\ P_2^T(k)A^{(i)} + B^T Y(k) & 4P_i(k) - 2(P_2(k) + P_2^T(k)) & P_2^T(k)(A^{(i)} - I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & -2P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & (A^{(i)} - I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & (A^{(i)} - I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ P_2^T(k)A^{(i)} + B^T Y(k) & -2P_2^T(k) & P_2^T(k)(A^{(i)} - I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & P_2^T(k) & P_2^T(k)G & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & Q_d^Y G^T P_2(k) & \alpha(k)I_q & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} \\ W_\xi & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & -W_\xi & 0_{N \times N} \\ W_u^T Y(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & -W_u \end{bmatrix}$$

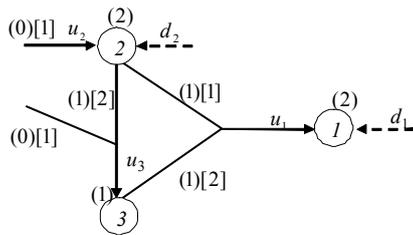


Рисунок 1 – Графічне представлення моделі мережі постачання Π_{ij} , яке вимагається в відповідності з технологічним процесом, вказані для кожного управляемого потоку в круглих і квадратних дужках, відповідно. Возле каждого узла в круглых скобках указаны значения времени выполнения заказа T_i . Специфика рассматриваемой системы в том, что на узел 1 действует только внешний спрос; на узел 2 действует как внешний, так и внутренний спрос со стороны узлов 1 и 3; на узел 3 – только внутренний спрос со стороны узла 1.

По формуле $\Lambda_i = \max\{T_{j,i} + T_i, i, j = \overline{1,3}, j \neq i\}$ определим величины запаздывания управляемых потоков для всех узлов сети, в результате получим $\Lambda = 3$. Тогда размерность расширенной модели сети равна $N = 12$.

Заданы максимальные вместительности хранилищ узлов сети и объемы транспортировок $x^{\max} = [120, 672, 240]^T$, $u^{\max} = [25, 130, 55]^T$, а также граничные значения внешнего спроса $d^{\min} = [7, 6]^T$, $d^{\max} = [20, 18]^T$.

Пусть время транспортировки ресурсов между узлами 2 и 3 в процессе функционирования сети может увеличиваться на один период, т.е. $T_{2,3} \in \{1, 2\}$. Тогда величина запаздывания управляемых потоков узла 3 принимает значение из множества $\Lambda_3 \in \{2, 3\}$. В результате получим $A(\theta) \in \Omega = \text{Co}\{A^{(1)}, A^{(2)}\}$, где

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} I_3 & B_1 & B_2^{(1)} & B_3^{(1)} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad A^{(2)} = \begin{bmatrix} I_3 & B_1 & B_2^{(2)} & B_3^{(2)} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$B_2^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_2^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(варьируемые элементы матриц подчеркнуты).

В соответствии с (8) уровни страховых запасов равны $x^* = [60, 336, 120]^T$. Следуя [12], вычислим параметры эллипсоида, аппроксимирующего множество значений внешнего спроса: $Q_d = \text{diag}(84, 5, 72, 0)$, $d^* = [13, 5, 12, 0]^T$; а также матрицу эллипсоида Q_x , аппроксимирующего множество X допустимых значений состояний. В качестве начального состояния выбраны значения страховых запасов $x(0) = x^*$, а значения диаго-

нальных весовых матриц равны $[W_\xi]_{ii} = 2, 0, i = \overline{1,12}$, $[W_u]_{jj} = 0, 1, j = \overline{1,3}$.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование осуществлялось в течение 15 периодов. Результаты моделирования получены путем численного решения последовательности задач (17) при ограничениях (18)–(20) в условиях скачкообразно изменяющегося внешнего спроса с помощью свободно распространяемого пакета CVX [12]. Результаты представлены на рис. 2 – рис. 4, где a – значения наличного и страхового уровней запаса; b – значения внешнего спроса и объемов заказа.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Вначале наблюдается переходный процесс, обусловленный тем, что в момент начала моделирования каналы транспортировки ресурсов не были загружены. В 4, 9 и 14 периодах значение матрицы динамики выбиралось равным $A^{(2)}$, в остальных периодах – $A^{(1)}$, следствием чего являются скачкообразные изменения объемов заказов в указанных периодах, особенно заметные для 1 и 3 узлов. В процессе моделирования фазовая траектория замкнутой системы не выходит за пределы инвариантных эллипсоидов, размеры которых зависят от выбранных значений весовых матриц W_ξ и W_u , определяющих критерий качества системы.

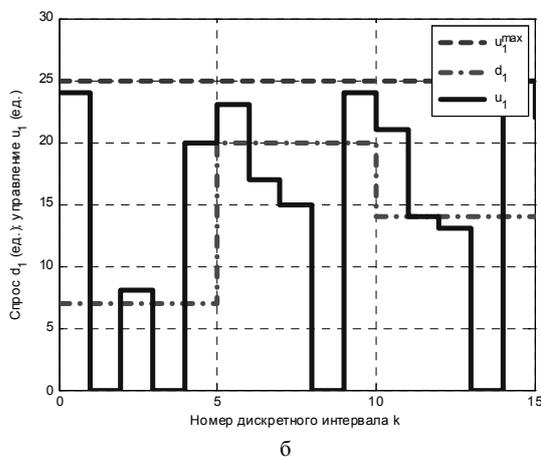
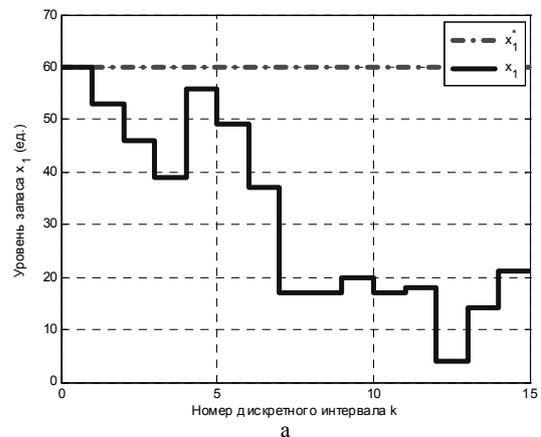


Рисунок 2 – Графики переходных процессов для узла 1

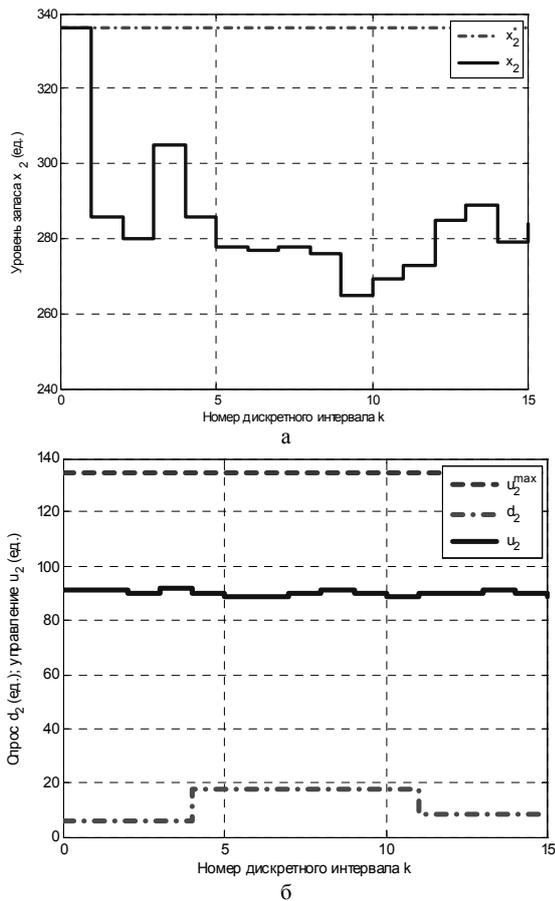


Рисунок 3 – Графики переходных процессов для узла 2

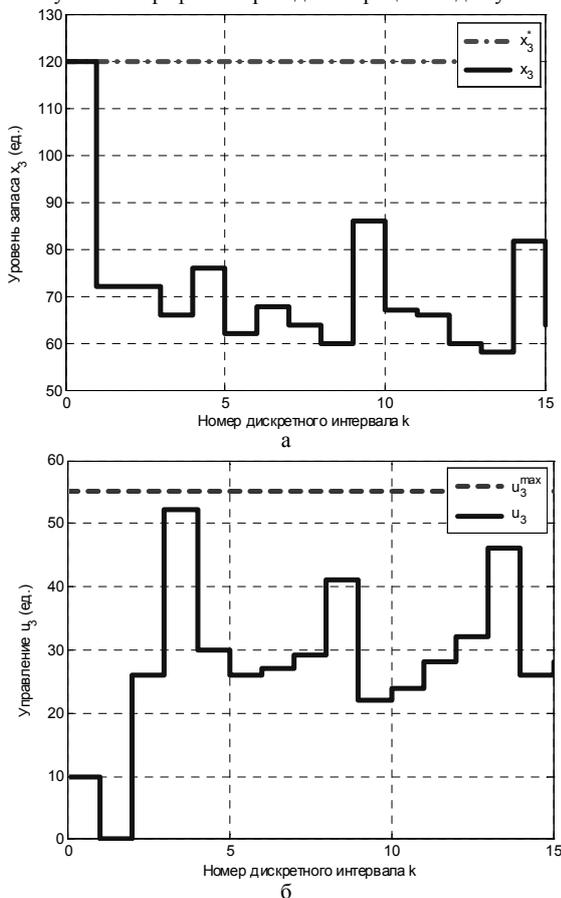


Рисунок 4 – Графики переходных процессов для узла 3

Результаты моделирования показали, что полученная стратегия управления запасами обеспечивает отсутствие дефицита ресурсов в сети, гарантированную стоимость управления, а также робастную устойчивость замкнутой системы при заданных ограничениях на состояния и управления.

ВЫВОДЫ

В статье предложен подход к решению задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами для сетей поставок с параметрической структурной неопределенностью в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и наличия несимметричных ограничений на значения состояний и управлений. Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Подход основан на использовании метода инвариантных эллипсоидов и параметризованной функции Ляпунова. Использование математического аппарата ЛМН позволило сформулировать задачу синтеза управления в виде последовательности задач полуопределенного программирования, для решения которых применяются свободно распространяемые специализированные программные пакеты. С помощью дескрипторного описания системы удалось добиться уменьшения консерватизма полученных результатов, поскольку матрицы неравенств не содержат произведения нестационарной матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, а при вычислении матрицы коэффициентов обратной связи используются матрицы, не зависящие явно от неопределенных параметров модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» «Развитие теории и методов синтеза децентрализованного робастного управления распределенными сетями поставок в условиях неопределенности» (номер государственной регистрации 0111U002285).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков П. С. Приближенные методы в параметрической робастности линейных систем управления : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.01 / Щербаков Павел Сергеевич. – М. : , 2004. – 215 с.
2. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2000. – Vol. 16, No. 3. – P. 313–317.
3. Дорофеев Ю. И. Построение математических моделей управляемых сетей поставок с учетом запаздываний потоков / Ю. И. Дорофеев, А. А. Никульченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 1. – С. 16–27.
4. Лотоцкий В. А. Модели и методы управления запасами / В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель. – М. : Наука, 1991. – 188 с.
5. Поляк Б. Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
6. Blanchini R. Set-theoretic methods in control / R. Blanchini, S. Miani. – Boston: Birkhäuser, 2008. – 494 p.
7. Чурилов А. Н. Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам / А. Н. Чурилов, А. В. Гессен. – СПб: С.-Петербург. гос. ун-т, 2004. – 148 с.

8. Feron E. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions / E. Feron, P. Apkarian, P. Gahinet // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1996. – Vol. 41. – P. 1041–1046.
9. Oliveira M. C. A new discrete-time robust stability condition / M. C. Oliveira, J. Bernussou, J. C. Geromel // *System & Control Letters*. – 1999. – Vol. 37. – P. 261–265.
10. Zhang W. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach / W. Zhang, H. Su, Y. Liang, Z. Han // *Latin American Applied Research*. – 2011. – Vol. 41, No. 4. – P. 359–364.
11. Дорофеев Ю. И. Синтез системы оптимального управления запасами с дискретным ПИД-регулятором с использованием ЛМН / Ю. И. Дорофеев // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – X. : ХУПС, 2014. – Вип. 4(41). – С. 34–41.
12. Grant M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 beta / M. Grant, Boyd S // [Electronic resource]. – Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

Статья поступила в редакцию 15.10.2015.
После доработки 19.10.2015.

Дорофеев Ю. И.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ДЕСКРИПТОРНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ ОБМЕЖЕНОГО РОБАСТНОГО ГАРАНТУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ЗАПАСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРИЗОВАНОЇ ФУНКЦІЇ ЛЯПУНОВА

Вирішено задачу синтезу робастного гарантуючого керування запасами для мереж поставок з параметричною структурною невизначеністю в умовах дії невідомого, але обмеженого зовнішнього попиту та наявності несиметричних обмежень на значення станів і керуючих дій. Закон керування будується у вигляді лінійного динамічного зворотного зв'язку за сигналом нев'язки між готівковими і страховими рівнями запасу ресурсів. Для подавлення впливу зовнішніх збурень, що моделюють зміни попиту, одночасно із забезпеченням робастної стійкості замкнутої системи застосований метод інваріантних еліпсоїдів, який був удосконалений за допомогою використання дескрипторного опису системи та побудови параметризованої функції Ляпунова, що дозволяє зменшити ступінь впливу невизначеності значень транспортних запізнювань на результат синтезу керування. За допомогою математичного апарату лінійних матричних нерівностей задача синтезу управління представлена у вигляді послідовності задач напіввизначеного програмування, для вирішення яких застосовуються широко поширювані спеціалізовані програмні пакети. В рамках запропонованої методики можливий вибір оптимальних значень страхових запасів ресурсів, оскільки розглянуте рішення задає, фактично, алгоритмічну залежність між рівнем страхових запасів і оптимальним значенням критерію якості. Розглянуто чисельний приклад.

Ключові слова: керування запасами, робастне керування, метод інваріантних еліпсоїдів, дескрипторний підхід, параметризована функція Ляпунова, лінійна матрична нерівність.

Dorofiev Yu. I.

PhD, Associate professor, Associate professor of department of system analysis and control, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

DESCRIPTOR APPROACH TO THE SYNTHESIS OF CONSTRAINED ROBUST GUARANTEED INVENTORY CONTROL USING PARAMETER-DEPENDENT LYAPUNOV FUNCTION

The problem of robust guaranteed inventory control synthesis for supply networks with parametric uncertainty under action of unknown, but bounded external demand and availability of non-symmetrical constraints on the values of states and controls is solved. The control law is constructed in the form of a linear dynamic feedback with respect to deviation between cash and safety stock levels of resources. In order to suppress the influence of external perturbations, modeling changes in demand, while ensuring robust stability of the closed system the method of invariant ellipsoids is used, which has been improved through the use descriptor system approach and building parameter-dependent Lyapunov function, which reduces the impact degree of uncertainty of the transport time-delays on the result of the synthesis control. With the help of the linear matrix inequalities technique the control synthesis problem is presented as a series of semidefinite programming, for solving which is used open source software. In the framework of the proposed method it is possible to choose the optimal values of safety stock levels of resources, as the resulting solution determines, in fact, an algorithmic relationship between the levels of safety stocks and the optimal value of the quality criterion. The numerical example is considered.

Keywords: inventory control, robust control, invariant ellipsoids method, descriptor approach, parameter dependent Lyapunov function, linear matrix inequality.

REFERENCES

1. Shherbakov P. S. *Priblizhennyye metody v parametricheskoj robnosti linejnyh sistem upravlenija* : dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk : 05.13.01 / Shherbakov Pavel Sergeevich. Moscow, 2004, 215 p.
2. Blanchini F., Pesenti R., Rinaldi F., Ukovich W. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, Vol. 16, No. 3, pp. 313–317.
3. Dorofiev Yu. I., Nikulchenko A. A. *Postroenie matematicheskikh modelej upravljajemyh setej postavok s uchetom zapazdyvanij potokov, Sistemi doslidzhennja ta informacijni tehnologii*, 2013, No. 1, pp. 16–27.
4. Lotockij V. A., Mandel' A. S. *Modeli i metody upravlenija zapasami*. Moscow, Nauka, 1991, 188 p.
5. Poljak B. T., Hlebnikov M. V., Shherbakov P. S. *Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushhenijah: tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv*. Moscow, LENAND, 2014, 560 p.
6. Blanchini R., Miani S. *Set-theoretic methods in control*. Boston, Birkhäuser, 2008, 494 p.
7. Churilov A. N., Gessen A. B. *Issledovanie linejnyh matrichnyh neravenstv. Putevoditel' po programmnyh paketam*. Sankt-Peterburg, SPbGU, 2004, 148 p.
8. Feron E., Apkarian P., Gahinet P. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, Vol. 41, pp. 1041–1046.
9. Oliveira M. C., Bernussou J., Geromel J. C. A new discrete-time robust stability condition, *System & Control Letters*, 1999, Vol. 37, pp. 261–265.
10. Zhang W., Su H., Liang Y., Han Z. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach, *Latin American Applied Research*, 2011, Vol. 41, No. 4, pp. 359–364.
11. Dorofiev Yu. I. *Sintez sistemy optimal'nogo upravlenija zapasami s diskretnym PID-reguljatorom s ispol'zovaniem LMN, Zbirnik naukovih prac' Kharkivs'kogo universitetu Povitrijanij Sil*. Kharkiv, KhUPS, 2014, Vip. 4(41), pp. 34–41.
12. Grant M., Boyd S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 beta [Electronic resource]. Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ ЛЕТУЧИХ МЫШЕЙ

В работе рассмотрен алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации. Данный метаэвристический алгоритм относится к алгоритмам роевого интеллекта, которые интенсивно развиваются в последние годы. Целью работы является усовершенствование алгоритма летучих мышей, исследование эффективности его работы и применение для решения оптимизационных задач. Предложен модифицированный вариант канонического алгоритма, в котором для вычисления скорости движения летучих мышей применена методика алгоритма роя частиц. Проведены вычислительные эксперименты по сравнению точности и скорости сходимости канонического и модифицированного алгоритмов. Установлено, что предложенный вариант алгоритма является более эффективным при нахождении глобального минимума унимодальных и мультимодальных тестовых функций. Исследована зависимость эффективности работы модифицированного алгоритма летучих мышей от задаваемых параметров. В качестве варьируемых параметров выбраны начальные значения громкости и интенсивности звукового сигнала, испускаемого летучими мышами. Модифицированный алгоритм применен для решения практической задачи минимизации стоимости расходных материалов, необходимых для изготовления сосуда высокого давления. Проведено сопоставление полученного решения данной оптимизационной задачи с результатами других авторов, которые применяли как классические, так и популяционные алгоритмы.

Ключевые слова: алгоритм летучих мышей, популяционный алгоритм, роевой интеллект, глобальная оптимизация.

НОМЕНКЛАТУРА

A_i – громкость звукового сигнала;
 $A_i^{(t+1)}$ – громкость сигнала i -ой летучей мыши на $(t+1)$ итерации;
 $\bar{A}(t)$ – среднее значение громкости звуковых сигналов всех летучих мышей;
 c_1, c_2 – заданные константы;
 $f(x)$ – целевая функция;
 $F(x)$ – вспомогательная целевая функция;
 $g_j(x)$ – ограничения-неравенства;
 i – номер летучей мыши;
 L – длина цилиндрической части сосуда высокого давления;
 m – размерность пространства;
 N – количество летучих мышей в популяции;
 r_i – интенсивность звукового сигнала;
 $r_i^{(t+1)}$ – интенсивность сигнала i -ой летучей на $(t+1)$ итерации;
 $rand$ – случайное число из интервала $[0, 1]$;
 R – внутренний радиус цилиндрической оболочки сосуда высокого давления;
 t – номер итерации алгоритма;
 $tMax$ – максимальное число итераций алгоритма;
 T_s – толщина стенки цилиндра сосуда высокого давления;
 T_h – толщина сферической головки сосуда высокого давления;
 v_i – скорость летучей мыши;
 $v_i^{(t)}$ – скорость перемещения i -ой летучей мыши на итерации t ;
 x_i – текущее положение летучей мыши;
 $x_i^{(t)}$ – положение i -ой летучей мыши на итерации t ;

x_{min} – минимальное значение координаты летучей мыши;
 x_{max} – максимальное значение координаты летучей мыши;
 x^* – точка глобального минимума;
 \bar{x} – положение летучей мыши, в котором найдено лучшее глобальное решение;
 \hat{x}_j – положение летучей мыши, в котором найдено ее лучшее решение;
 X – множество допустимых решений;
 α – заданный коэффициент из интервала $[0, 1]$;
 β – случайное число из интервала $[0, 1]$;
 γ – заданный коэффициент;
 ε – случайное число из интервала $[-1, 1]$;
 μ_j – константы штрафа;
 ξ_1, ξ_2 – случайные числа из интервала $[0, 1]$;
 χ – коэффициент сжатия;
 ω_i – частота звукового сигнала;
 ω_{min} – минимальное значение частоты звукового сигнала;
 ω_{max} – максимальное значение частоты звукового сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих актуальных проблем в различных прикладных и фундаментальных науках сводится к задаче глобальной оптимизации. Существующие численные методы оптимизации можно условно разделить на две группы: детерминистические и стохастические. Детерминистические методы, как правило, требуют нахождения градиента целевой функции и зависят от выбора начальных значений, при фиксированном значении которых всегда приводят к тому же результату. Однако целевая функция в задачах глобальной оптимизации может быть недифференцируемой либо разрывной, или же нелинейной либо мультимодальной, усложняя тем

самым решение задачи. Для эффективного решения подобных задач широко используют стохастические методы, которые не накладывают дополнительных ограничений на поставку задачи.

Стохастические поисковые алгоритмы начали интенсивно развиваться в 1980-х гг., в литературе их также называют метаэвристическими, популяционными, многоагентными и алгоритмами роевого интеллекта (Swarm intelligence) [1]. Данные алгоритмы предполагают одновременную обработку нескольких возможных вариантов решения оптимизационной задачи. Еще одной особенностью подобных алгоритмов является их бионическая природа. Многоагентные алгоритмы описывают динамику поведения групп различных социальных животных, птиц, насекомых и прочих агентов некоторой биологической системы, которые локально взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Коллективное поведение группы агентов позволяет им решать различные сложные практические задачи в природе, что свидетельствует про эффективность алгоритмов роевого интеллекта, моделирующих их поведение. Поэтому актуальной является задача построения и исследования популяционных алгоритмов, а также расширение области их применения [2].

Среди многообразия популяционных алгоритмов можно выделить следующие группы: алгоритмы, инспирированные живой природой (nature-inspired algorithms); алгоритмы, инспирированные неживой природой; алгоритмы, инспирированные человеческим обществом и другие [3]. К наиболее известным алгоритмам, вдохновленным живой природой, относятся: муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization, 1992), метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, 1995), бактериальная оптимизация (Bacterial Optimisation, 2002), алгоритм пчелиного роя (Bees Algorithm, 2005), алгоритм светлячков (Firefly Algorithm, 2007), поиск косяком рыб (Fish School Search, 2008), алгоритм кукушки (Cuckoo Search, 2009), алгоритм летучих мышей (Bat Algorithm, 2010) и др. Алгоритмы, инспирированные неживой природой, имитируют процессы, происходящие в физике, химии и др., в частности это: стохастический диффузионный поиск (Stochastic Diffusion Search, 1989), дифференциальная эволюция (Differential Evolution, 1997), электромагнитный алгоритм (ElectroMagnetism-like Algorithm, 2003), гармонический поиск (Harmony Search, 2008), алгоритм гравитационного поиска (Gravitational Search, 2009) и др. К алгоритмам, инспирированным человеческим обществом, принадлежат: алгоритм эволюции разума (Mind Evolutionary Computation, 1998), культурный алгоритм (Cultural Algorithm, 1994) и др.

Объектом данного исследования является процесс решения задачи глобальной оптимизации при помощи алгоритмов роевого интеллекта. Одним из новых алгоритмов данного типа является алгоритм, инспирированный поведением летучих мышей (алгоритм летучих мышей), предложенный Xin-She Yang в 2010 г. [4]. Этот алгоритм является потенциально более мощным, чем алгоритм роя частиц, генетический алгоритм, а так же гармонический поиск. Более того, гармонический поиск и алгоритм роя частиц являются особыми случаями алгоритма летучих мышей при соответствующих упрощениях [5].

Предметом исследования выступает метаэвристический алгоритм летучих мышей решения оптимизационных задач.

Целью данной работы является усовершенствование алгоритма летучих мышей, исследование эффективности его работы и применение для решения задач глобальной оптимизации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дана целевая функция $f(x)$, определенная на множестве допустимых решений $X \subseteq R^m$.

Требуется найти глобальный условный минимум функции $f(x)$ на множестве X :

$$f(x^*) = \min_{x \in X \subseteq R^m} f(x), \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, $X = \{x \mid x_i \in [x_{\min}, x_{\max}], i \in \overline{1, m}\}$.

Задача поиска максимума функции $f(x)$ сводится к задаче поиска минимума:

$$f(x^*) = \max_{x \in X \subseteq R^m} f(x) = -\min_{x \in X \subseteq R^m} (-f(x)).$$

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Алгоритм летучих мышей относится к биоинспирированным алгоритмам роевого интеллекта, который основывается на их уникальных эхолокационных возможностях. Большинство видов летучих мышей обладают совершенными средствами эхолокации, которые используются ими для обнаружения добычи и препятствий. Для этого во время полета они испускают частотно-модулированные звуковые сигналы и улавливают эхо, отраженное от окружающих объектов и предметов. В разных семействах летучих мышей параметры испускаемых звуковых импульсов различаются, определяя тем самым стратегии их охоты и поведения.

Рассматриваемый алгоритм летучих мышей в целом является достаточно эффективным, однако, как и любой другой популяционный алгоритм, он не является универсальным методом решения всех оптимизационных задач. Для усовершенствования и расширения области применения алгоритма на данный момент предложено немало его модификаций. Так, автор алгоритма в 2011 г. обобщил его для многоэкстремальных оптимизационных задач, и получил многокритериальный алгоритм летучих мышей (Multi-objective Bat Algorithm) [6]. Nakamura R. и др. в 2012 г. разработали бинарный алгоритм летучих мышей (Binary Bat Algorithm) для решения задач комбинаторной оптимизации [7]. Многие модификации алгоритма летучих мышей, получают путем гибридизации как с различными популяционными алгоритмами, так и с абсолютно другими методами. Среди таких алгоритмов, например: гибридный алгоритм летучих мышей (Hybrid Bat Algorithm), который получен Fister I. J. и др. в 2013 г. [8] в результате гибридизации с алгоритмом дифференциальной эволюции; комбинированный алгоритм летучих мышей и гармонического поиска, предложили G. Wang и L. Guo [9] и т. д.

Следует отметить, что вариации алгоритма летучих мышей применяются для решения широкого круга за-

дач, в частности это: любые оптимизационные задачи, а также задачи классификации и кластеризации объектов, анализ данных, обработка изображений, нечеткая логика и др. С обзором различных модификаций алгоритма и примерами его практического применения можно ознакомиться в [10]. Таким образом, рассматриваемый популяционный алгоритм, инспирированный поведением летучих мышей, представляет интерес для дальнейших исследований.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными составляющими алгоритма являются: особенности перемещения летучих мышей в пространстве, и характеристики испускаемых ими звуковых сигналов.

Работа алгоритма основывается на следующей модели поведения летучих мышей [4]:

1. Все летучие мыши используют эхолокацию, чтобы определять расстояние, а также различать еду/добычу и препятствия.

2. Текущее положение каждой летучей мыши обозначим x_i , из него она перемещается случайным образом со скоростью v_i . В процессе движения летучие мыши испускают звуковые сигналы, имеющие частоту ω_i и громкость A_i . При этом они могут изменять как частоту, так и интенсивность испускаемых импульсов $r_i \in [0,1]$, в зависимости от близости к цели.

3. Громкость звукового сигнала изменяется от большего начального значения A_0 до меньшего заданного A_{\min} .

Положения всех летучих мышей в начальный момент задаются случайным образом. Дальнейшее перемещение каждой из них происходит согласно следующей миграционной процедуре:

$$\omega_i = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \beta, \quad (2)$$

$$v_i^{(t+1)} = v_i^{(t)} + (x_i^{(t)} - \bar{x}) \cdot \omega_i, \quad (3)$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}, \quad (4)$$

где $\omega_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$.

Для определения новых положений летучих мышей, каждая из них осуществляет локальный поиск в окрестности своего текущего положения путем случайного блуждания:

$$x_i^{(new)} = x_i^{(old)} + \varepsilon \cdot \bar{A}(t). \quad (5)$$

Эволюция параметров, характеризующих испускаемые звуковые сигналы, осуществляется по формулам:

$$A_i^{(t+1)} = \alpha \cdot A_i^{(t)}, \quad (6)$$

$$r_i^{(t+1)} = r_i^{(0)} \cdot (1 - e^{-\gamma t}), \quad (7)$$

здесь рекомендуемые значения констант α и γ равны 0,9.

Согласно (6)–(7), с увеличением числа итераций громкость испускаемых звуковых сигналов будет уменьшать-

ся, а их интенсивность увеличиваться, моделируя этим приближение летучей мыши к цели:

$$A_i^{(t)} \rightarrow 0, \quad r_i^{(t)} \rightarrow r_i^{(0)} \quad \text{при } t \rightarrow \infty.$$

Алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации (1) представим в виде следующего псевдокода:

1. Инициализация популяции: задать начальное положение x_i и скорость v_i каждой i -ой летучей мыши, $i = \overline{1, N}$.

2. Инициализация характеристик звуковых импульсов: задать частоту ω_i , интенсивность r_i и громкость A_i для каждой i -ой летучей мыши, $i = \overline{1, N}$.

3. Пока $t \leq t_{\max}$

4. Для $i = \overline{1, N}$

5. Перемещение каждой i -ой летучей мыши по формулам (2)–(4).

6. Если $rand > r_i$

7. Выполнение локального поиска в окрестности текущего положения путем случайного блуждания по формуле (5).

8. Конец если.

9. Если $rand < A_i$ и $f(x_i^{(new)}) < f(\bar{x})$

10. Новое положение принято $x_i^{(t+1)} \leftarrow x_i^{(new)}$.

11. Уменьшить A_i и увеличить r_i согласно (6)–(7).

12. Конец если

13. Обновить \bar{x} .

14. Конец для.

15. Увеличить счетчик числа итераций $t \leftarrow t + 1$.

16. Конец пока.

В каноническом варианте алгоритма случайно выбираются те летучие мыши, которые осуществляют локальный поиск, в результате которого обновляется каждая из их координат. Чтобы повысить эффективность поиска в многомерном случае, можно по аналогии выбирать случайно пространственные координаты, подлежащая изменению. Такая модификация предполагает внесение изменений в 7 строке алгоритма на следующие:

для $j = \overline{1, m}$

если $rand > r_i$

$$x_{ij}^{(new)} = x_{ij}^{(old)} + \varepsilon \cdot \bar{A}(t)$$

конец если

конец для

Также в процессе миграции летучих мышей целесообразно использовать информацию не только о глобальном лучшем решении, выбранном среди всех, но и о лучшем решении, найденном каждой летучей мышью. Модифицируем способ вычисления скорости перемещения летучих мышей, используя подход, предложенный М. Clerc и J. Kennedy для алгоритма роя частиц [11]. Результирующая скорость каждой летучей мыши определяется следующими формулами:

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|}, \quad \varphi = c_1 + c_2,$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_i^{(t+1)} &= \chi(v_i^{(t)} + c_1 \varepsilon_1 (\bar{x}_i - x_i^{(t)}) + c_2 \varepsilon_2 (\bar{x} - x_i^{(t)})), \\ v_i^{(t+1)} &= \bar{v}_i^{(t)} + (x_i^{(t)} - \bar{x}) \cdot \omega_i, \end{aligned}$$

где $c_1 = c_2 = 2,05$.

Представленные модификации позволили получить более эффективный вариант алгоритма летучих мышей для нахождения глобального минимума целевой функции.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения вычислительных экспериментов выбрали ряд тестовых функций:

1. Функция де Джонга:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^m x_i^2, \quad -10 \leq x_i \leq 10.$$

Глобальный минимум функции $f_1(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

2. Функция Розенброка:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{m-1} \left((x_i - 1)^2 + 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 \right), \quad -5 \leq x_i \leq 5.$$

Глобальный минимум функции $f_2(x^*) = 0$ при $x^* = (1, 1, \dots, 1)$.

3. Функция Растригина:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^m \left(x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right) + 10m, \quad -5 \leq x_i \leq 5.$$

Глобальный минимум функции $f_3(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

4. Функция Экли:

$$f_4(x) = 20 + e - 20 \exp \left(-\frac{1}{5} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \cos(2\pi x_i) \right),$$

$$-20 \leq x_i \leq 20.$$

Глобальный минимум функции $f_4(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

Среди представленных функций выбраны как унимодальные функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$, так и мультимодальные функции $f_3(x)$ и $f_4(x)$.

Для иллюстрации практического применения алгоритма рассмотрим инженерную задачу оптимизации конструкции цилиндрического сосуда высокого давления. Целевая функция определяет стоимость расходных материалов, необходимых для его изготовления. Дизайн конструкции сосуда определяется следующими параметрами: толщина стенки цилиндра $T_h(x_1)$, толщина сфери-

ческой головки $T_h(x_2)$, внутренний радиус цилиндрической оболочки $R(x_3)$, длина цилиндрической части $L(x_4)$ (см. рис. 1) [12].

В результате получаем задачу нелинейной оптимизации:

$$f(x) = 0,6224x_1x_3x_4 + 1,7781x_2x_3^2 + 3,1661x_1^2x_4 + 19,84x_1^2x_3 \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$g_1(x) = -x_1 + 0,0193x_3 \leq 0, \quad (9)$$

$$g_2(x) = -x_2 + 0,00954x_3 \leq 0, \quad (10)$$

$$g_3(x) = -\pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3} \pi x_3^3 + 12960000 \leq 0, \quad (11)$$

$$g_4(x) = x_4 - 240 \leq 0, \quad (12)$$

$$x_1 \geq 1 \times 0,0625, \quad x_2 \leq 99 \times 0,0625, \quad x_3 \geq 10, \quad x_4 \leq 200. \quad (13)$$

В задаче (8)–(13) переменные x_1 и x_2 являются дискретными величинами, которые должны быть кратны 0,0625 в соответствии имеющейся толщиной листового проката стали.

Для решения представленной задачи используем метод штрафов и перейдем к следующей задаче:

$$F(x) = f(x) + \sum_{j=1}^4 \mu_j \cdot \max(0, g_j^2(x)) \rightarrow \min.$$

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Канонический и модифицированный алгоритмы реализованы в среде MATLAB R2012b. При сравнении результатов решения задачи (1) каноническим алгоритмом летучих мышей (ВА) и модифицированным (MdBA), каждый алгоритм применялся для каждой функции 50 раз. Используются следующие значения констант и параметров: $t_{\max} = 1000$, $N = 30$, $\omega_{\min} = 0$, $\omega_{\max} = 2$, $A_i^{(0)} = 0,8$, $r_i^{(0)} = \text{rand}$, $\alpha = 0,9$, $\gamma = 0,9$. Полученные результаты для набора тестовых функций приведены в табл. 1.

Алгоритм летучих мышей содержит ряд варьируемых параметров, от значения которых, может сильно зависеть его эффективность. Исследуем зависимость эффективности работы модифицированного алгоритма от значений громкости $A_i^{(0)}$ и интенсивности $r_i^{(0)}$ звукового сигнала.

В первой серии экспериментов зафиксировали $r_i^{(0)} = 0,5$, а значение громкости изменяли в диапазоне от 0,1 до 1 при $m = 10$. В следующих экспериментах полагали $A_i^{(0)} = 0,5$, а интенсивность сигнала изменяли также от 0,1 до 1. Результаты вычислительных экспериментов представлены в табл. 2–3.

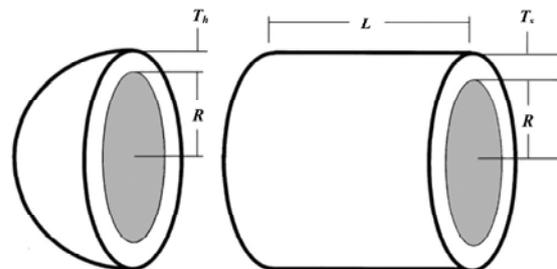


Рисунок 1 – Конструкция сосуда высокого давления

Таблица 1 – Результаты вычислительных экспериментов для тестовых функций

Функция	Размерность пространства, m	Алгоритм	Лучшее полученное значение целевой функции	Среднее среди полученных значений целевой функции	Худшее полученное значение целевой функции
$f_1(x)$	5	BA	7,5366e-03	3,9121e-01	1,3720e+00
		MdBA	1,7115e-10	4,7063e-09	3,6887e-08
	10	BA	4,3757e-01	1,8943e+00	4,0154e+00
		MdBA	1,0420e-07	5,1940e-07	1,7923e-06
	20	BA	2,2767e+00	5,6863e+00	9,1286e+00
		MdBA	1,5330e-06	7,8947e-06	2,5199e-05
$f_2(x)$	5	BA	2,8084e+00	3,2013e+01	1,0299e+02
		MdBA	2,5161e-06	2,3596e-01	3,9309e+00
	10	BA	5,8462e+01	2,2555e+02	5,6098e+02
		MdBA	3,4659e-03	8,7276e-01	9,6060e+00
	20	BA	1,6786e+02	8,7887e+02	1,7818e+03
		MdBA	7,0456e+00	1,1763e+01	1,9499e+01
$f_3(x)$	5	BA	6,0018e+00	1,6457e+01	2,7852e+01
		MdBA	3,8424e-01	2,3481e+00	6,9647e+00
	10	BA	3,3129e+01	5,3871e+01	7,2348e+01
		MdBA	1,9900e+00	6,7658e+00	1,5919e+01
	20	BA	1,0428e+02	1,4207e+02	1,6817e+02
		MdBA	5,9703e+00	1,7632e+01	3,6819e+01
$f_4(x)$	5	BA	5,7667e-01	2,3916e+00	3,8869e+00
		MdBA	1,8981e-05	3,3047e-02	1,6462e+00
	10	BA	2,0987e+00	3,2280e+00	4,0536e+00
		MdBA	3,7299e-04	2,4011e-02	1,1552e+00
	20	BA	2,6300e+00	4,2518e+00	3,5454e+00
		MdBA	1,5550e-03	2,1306e-01	2,1712e+00

Таблица 2 – Зависимость решения от начального значения громкости сигнала

	$A_i^{(0)}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f_1(x)$	7,96e-08	8,45e-08	1,10e-07	1,26e-07	1,57e-07	1,58e-07	1,69e-07	2,18e-07	2,09e-07	2,51e-07
$f_2(x)$	1,21e+01	6,28e+00	9,73e+00	8,11e+00	6,97e+00	4,85e+00	3,97e+00	3,71e+00	5,35e+00	4,95e+00
$f_3(x)$	6,94e+00	9,35e+00	9,55e+00	1,01e+01	1,23e+01	1,29e+01	1,53e+01	1,54e+01	1,47e+01	1,70e+01
$f_4(x)$	3,48e-04	3,76e-04	4,20e-04	4,45e-04	4,63e-04	4,78e-04	5,16e-04	5,63e-04	2,36e-02	9,68e-02

Таблица 3 – Зависимость решения от начального значения интенсивности сигнала

	$r_i^{(0)}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f_1(x)$	2,18e-07	1,97e-07	1,75e-07	1,57e-07	1,41e-07	5,41e-07	5,06e-04	8,84e-02	1,36e+00	1,19e+01
$f_2(x)$	8,77e-01	9,63e-01	7,90e-01	1,56e+00	5,84e+00	1,67e+01	2,65e+01	1,47e+02	3,89e+02	4,27e+03
$f_3(x)$	1,74e+01	1,29e+01	1,19e+01	1,18e+01	1,47e+01	1,33e+01	1,21e+01	2,80e+01	4,98e+01	6,74e+01
$f_4(x)$	1,20e+00	2,22e-01	1,70e-01	6,38e-02	5,11e-04	3,38e-02	9,47e-02	1,65e+00	3,77e+00	5,19e+00

Рассмотрим изменение значения целевой функции в процессе поиска экстремума для функций Растригина и Экли, соответствующие графики приведены на рис. 2. В каноническом и модифицированном алгоритмах полагали $m=10$, и с учетом результатов табл. 2–3 $A_i^{(0)} = 0,35$, $r_i^{(0)} = 0,4$.

Модифицированный алгоритм летучих мышей применен для решения задачи о дизайне сосуда высокого давления (8)–(13) и получено следующее лучшее решение:

$$f(x^*) = 6059,1316103768,$$

$$x^* = (0,8125, 0,4375, 42,0984440172, 176,6366206192).$$

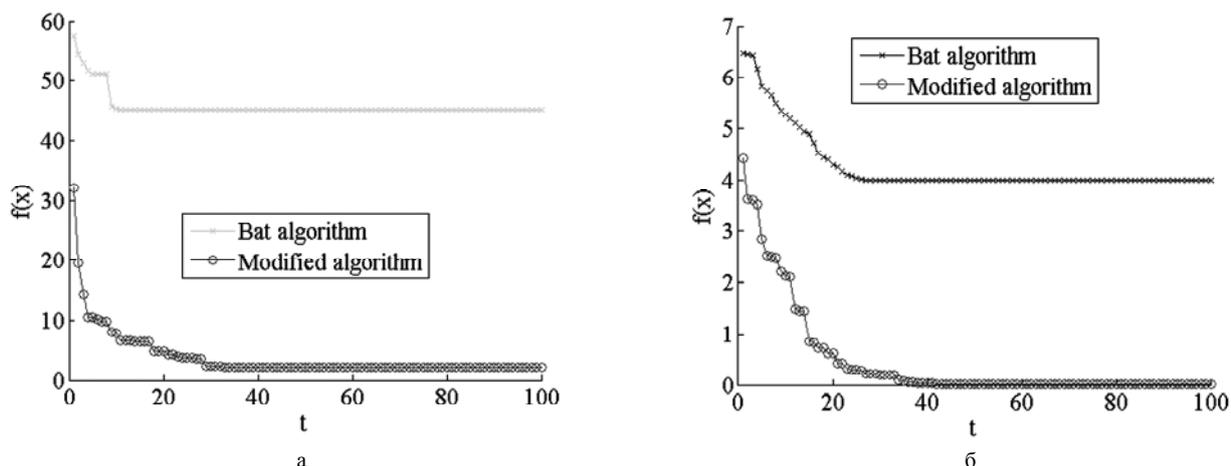


Рисунок 2 – Графики изменения значений функции:
 а – Растригина, б – Экли

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислительных экспериментов показали, что модифицированный алгоритм летучих мышей является более эффективным по сравнению с каноническим вариантом для решения задачи глобальной оптимизации. Графики изменения значений целевой функции показали, что модифицированный алгоритм характеризуется более высокой скоростью сходимости и точностью нахождения оптимального значения. Недостатком модифицированного алгоритма является время его выполнения, которое больше времени выполнения канонического алгоритма. Исследована зависимость эффективности модифицированного алгоритма от таких параметров алгоритма как громкость и интенсивность звукового сигнала. Можно сделать вывод, что влияние данных параметров сильно зависит от вида целевой функции. Поэтому оптимальные значения громкости и интенсивности сигнала должны выбираться в каждом конкретном случае индивидуально, при этом отправными могут быть такие значения: $A_i^{(0)} = 0,25 \dots 0,35$, $r_i^{(0)} = 0,3 \dots 0,4$.

Решением задачи о минимизации расходов на изготовление сосуда высокого давления занимались многие авторы, применяя различные методы. Сопоставление результатов решения данной оптимизационной задачи предложенным модифицированным алгоритмом летучих мышей с некоторыми уже известными результатами приведено в табл. 4.

Из данных, представленных в табл. 4 видно, что лучшие результаты при решении задачи (8)–(13) получены с использованием популяционных алгоритмов. Значение целевой функции, полученное модифицированным алгоритмом летучих мышей меньше значений, полученных многими другими алгоритмами, использующими принципы роевого интеллекта. Это свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма. Однако, на сегодняшний день известны новые результаты с лучшим решением, например, найденное алгоритмом серых волков [20]. Тем не менее, модифицированный алгоритм летучих мышей является достаточно конкурентоспособным для решения практических задач и предполагает дальнейшее развитие.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена задача нахождения глобального минимума целевой функции при помощи алгоритма, инспирированного поведением летучих мышей, который относится к алгоритмам роевого интеллекта.

Канонический алгоритм летучих мышей усовершенствован за счет применения методики алгоритма роя частиц для вычисления скорости движения агентов. Результаты вычислительных экспериментов показали, что модифицированный алгоритм летучих мышей характеризуется более высокой скоростью сходимости и точностью нахождения оптимального значения целевой функции.

Таблица 4 – Результаты решения задачи о дизайне сосуда высокого давления

Авторы	Метод	$f(x^*)$
E. Sandgren (1988) [13]	Метод ветвей и границ	8129,1036
B. Kannan, S. Kramer (1994) [14]	Метод множителей Лагранжа	7198,0428
Q. He, L. Wang (2007) [15]	Алгоритм роя частиц	6061,0777
E. Mezura-Montes и др. (2007) [16]	Модифицированный метод дифференциальной эволюции	6059,701660
L. Cagnina и др. (2008) [12]	Алгоритм роя частиц	6059,714335
H. Bernardino и др. (2008) [17]	Генетический алгоритм, скрещенный с алгоритмом искусственной иммунной системы (GA-AIS)	6059,85
A. Kaveh, S. Talatahari (2010) [18]	Муравьиный алгоритм	6059,7258
B. Akay, D. Karaboga (2012) [19]	Алгоритм искусственной пчелиной колонии	6059,714339
S. Mirjalili и др. (2014) [20]	Алгоритм серых волков	6051,5639
Данная работа	Модифицированный алгоритм летучих мышей	6059,131610

При помощи модифицированного алгоритма решения практическая задача о минимизации расходов на изготовление сосуда высокого давления. Найденное решение является одним из лучших, среди многих вариантов решений, полученных другими авторами с применением различных популяционных алгоритмов.

Таким образом, предложенный модифицированный алгоритм летучих мышей является эффективным методом поиска экстремума целевой функции любой сложности. Учитывая универсальность и преимущества данного алгоритма, дальнейшие исследования будут нацелены на его применение в методах кластеризации, в частности для k-means.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 448 с.
- Субботін С. О. Нейтеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
- Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов / А. П. Карпенко // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2012. – № 7. – С. 1–32.
- Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm / X. S. Yang // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). – 2010. – Vol. 284. – P. 65–74.
- Частикова В. А. Алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации / В. А. Частикова, Е. Ф. Новикова // Научные труды КубГТУ (электронный сетевой политематический журнал) [Электронный ресурс]. – № 2. – 2015. – Режим доступа : <http://ntk.kubstu.ru/file/348>.
- Yang X. S. Bat algorithm for multi-objective optimization / X. S. Yang // International Journal of Bio-Inspired Computation. – 2011. – Vol. 3, № 5. – P. 267–274. DOI:10.1504/IJBIC.2011.042259.
- M BBA: a binary bat algorithm for feature selection / [Nakamura R., Pereira L., Costa K. and other] // Conference on graphics, patterns and images (25th SIBGRAPI), August 22–25, 2012 : IEEE Publication. – P. 291–297. DOI:10.1109/SIBGRAPI.2012.47.
- Fister I. J. A hybrid bat algorithm / I. J. Fister, D. Fister, X. S. Yang // Electrotechnical Review. – 2013. – Vol. 80, № 1–2. – P. 1–7.
- Wang G. A Novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization / Gaige Wang, Lihong Guo // Journal of Applied Mathematics : Hindawi Publishing Corporation [Электронный ресурс]. – Vol. 2013. DOI: 0.1155/2013/696491.
- Yang X. S. Bat algorithm: literature review and applications / Xin-She Yang, Xingshi He // International Journal of Bio-Inspired Computation. – 2013. – Vol. 5. – № 3. – P. 141–149. DOI:10.1504/IJBIC.2013.055093.
- Clerc M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – № 1. – P. 58–73. DOI:10.1109/4235.985692.
- Cagnina L. C. Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer / L. C. Cagnina, S. C. Esquivel, C. A. C. Coello // Informatica. – 2008. – Vol. 32, № 3. – P. 319–326.
- Sandgren E. Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design / E. Sandgren // Proceedings of the ASME Design Technology Conference : Kissimmee. – 1988. – P. 95–105.
- Kannan B. An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design / B. Kannan, S. N. Kramer // Journal of mechanical design. – 1994. – Vol. 116, № 2. – P. 405–411. DOI:10.1115/1.2919393.
- He Q. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems / Qie He, Ling Wang // Engineering applications of artificial intelligence. – 2007. – Vol. 20, № 1. – P. 89–99.
- Multiple trial vectors in differential evolution for engineering design / Mezura-Montes E., Coello Coello C. A., Velázquez-Reyes J., Muñoz-Dávila L. // Engineering Optimization. – 2007. – Vol. 39, № 5. – P. 567–589.
- Bernardino H. S. A new hybrid AIS-GA for constrained optimization problems in mechanical engineering / H. S. Bernardino, H. J. C. Barbosa, A. C. C. Lemonge, L. G. Fonseca // Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 1–6 June 2008. – P. 1455–1462. DOI:10.1109/CEC.2008.4630985.
- Kaveh A. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems / A. Kaveh, S. Talatahari // Engineering Computations. – 2010. – Vol. 27, № 1. – P. 155–182.
- Akay B. Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization / Bahriye Akay, Dervis Karaboga // Journal of intelligent manufacturing. – 2012. – Vol. 23, № 4. – P. 1001–1014.
- Mirjalili S. Grey wolf optimizer / S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis // Advances in engineering software. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61.

Статья поступила в редакцию 03.09.2015.

После доработки 11.10.2015.

Красношлик Н. О.

Канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики та інформатики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ГЛОБАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДИФІКОВАНИМ АЛГОРИТМОМ КАЖАНІВ

У роботі розглянуто алгоритм кажанів для розв'язування задачі глобальної оптимізації. Даний метаевристичний алгоритм відноситься до алгоритмів ройового інтелекту, які інтенсивно розвиваються в останні роки. Метою роботи є удосконалення алгоритму кажанів, дослідження ефективності його роботи і застосування для розв'язування оптимізаційних задач. Запропоновано модифікований варіант канонічного алгоритму, в якому для обчислення швидкості руху кажанів застосована методика алгоритму рою часток. Проведено обчислювальні експерименти з порівняння точності і швидкості збіжності канонічного та модифікованого алгоритмів. Встановлено, що запропонований варіант алгоритму є більш ефективним при знаходженні глобального мінімуму унімодальних і мультимодальних тестових функцій. Досліджено залежність ефективності роботи модифікованого алгоритму кажанів від заданих параметрів. В якості варіюваних параметрів обрані початкові значення гучності та інтенсивності звукового сигналу, що випускається кажанами. Модифікований алгоритм застосований для розв'язання практичної задачі мінімізації вартості витратних матеріалів, необхідних для виготовлення посудини високого тиску. Проведено співставлення отриманого розв'язку даної оптимізаційної задачі з результатами інших авторів, які використовувати як класичні, так і популяційні алгоритми.

Ключові слова: алгоритм кажанів, популяційний алгоритм, ройовий інтелект, глобальна оптимізація.

Krasnoshlyk N. O.

PhD, Associate professor of department of informatics and applied mathematics, Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

A MODIFIED BAT ALGORITHM FOR SOLVING GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEM

In this paper we consider a bat algorithm for solving the problem of global optimization. This metaheuristic algorithm applies to swarm intelligence algorithms, which are developing rapidly in recent years. The aim of the work is to improve the bat algorithm, study its efficiency and application for solving optimization problems. A modified version of the algorithm in which to calculate speed of the bats used the technique of particle swarm optimization is proposed. The computational experiments have been conducted to compare the accuracy and the speed of convergence of the canonical and the modified algorithms. It was found that the proposed version of the algorithm is more effective in finding the global minimum of unimodal and multimodal test functions. The dependence of the efficiency of modified bat algorithm from the set parameters is investigated. As variable parameters chosen initial values of the loudness and pulse emission rate emitted by bats. The modified algorithm is applied to solve practical problem of minimize the cost of pressure vessel design. The comparison of the solution of the optimization problem with the results of other authors who used both classical and population algorithms was conducted.

Keywords: bat algorithm, population algorithm, swarm intelligence, global optimization.

REFERENCES

1. Karpenko A. P. Sovremennyye algoritmy poiskovoy optimizatsii. Algoritmy, vdohnovlennyye prirodoy : uchebnoye posobie. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Bauman, 2014, 448 p.
2. Subbotin S. O., Olijnyk A. O., Olijnyk O. O. Neiteratyvni, evoluciyni ta mul'tyagentni metody syntezu nechitkologichnyh i nejrromerzhnyh modelej : monografija ; pid zag. red. S. O. Subbotina, Zaporizhzhja, ZNTU, 2009, 375 p.
3. Karpenko A. P. Populjacionnyye algoritmy global'noj poiskovoy optimizatsii. Obzor novyh i maloizvestnyh algoritmov, *Prilozhenie k zhurnalu «Informacionnyye tehnologii»*, 2012, No. 7, pp. 1–32.
4. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm, *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*, 2010, Vol. 284, pp. 65–74.
5. Chastikova V. A., Novikova E. F. Algoritmy letuchih myshej dlja reshenija zadachi global'noj optimizatsii, *Nauchnyye trudy KubGTU (jelektronnyj setevoy politematicheskij zhurnal)*, No. 2, 2015, <http://ntk.kubstu.ru/file/348>.
6. Yang X. S. Bat algorithm for multi-objective optimization, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2011, Vol. 3, No. 5, pp. 267–274. DOI:10.1504/IJBIC.2011.042259.
7. Nakamura R., Pereira L., Costa K., Rodrigues D., Papa J., Yang X. BBA: a binary bat algorithm for feature selection, *Conference on graphics, patterns and images (25th SIBGRAPI)*, August 22–25, 2012, IEEE Publication, pp. 291–297. DOI:10.1109/SIBGRAPI.2012.47.
8. Fister I. J., Fister D., Yang X. S. A hybrid bat algorithm, *Electrotechnical Review*, 2013, Vol. 80, No. 1–2, pp. 1–7.
9. Wang G., Guo L. A Novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization, *Journal of Applied Mathematics*, Hindawi Publishing Corporation [Электронный ресурс], Vol. 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/696491>.
10. Yang X. S., He X. Bat algorithm: literature review and applications, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2013, Vol. 5, No. 3, pp. 141–149. DOI:10.1504/IJBIC.2013.055093.
11. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, Vol. 6, No. 1, pp. 58–73. DOI:10.1109/4235.985692.
12. Cagnina L. C., Esquivel S. C., Coello C. A. C. Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer, *Informatica*, 2008, Vol. 32, No. 3, pp. 319–326.
13. Sandgren E. Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design, *Proceedings of the ASME Design Technology Conference*, Kissimmee, 1988, pp. 95–105.
14. Kannan B., Kramer S. N. An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design, *Journal of mechanical design*, 1994, Vol. 116, No. 2, pp. 405–411. DOI:10.1115/1.2919393.
15. He Q., Wang L. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems, *Engineering applications of artificial intelligence*, 2007, Vol. 20, No. 1, pp. 89–99.
16. Mezura-Montes E., Coello Coello C. A., Velázquez-Reyes J., Muñoz-Dávila L. Multiple trial vectors in differential evolution for engineering design, *Engineering Optimization*, 2007, Vol. 39, No. 5, pp. 567–589.
17. Bernardino H. S., Barbosa H. J. C., Lemonge A. C. C., Fonseca L. G. A new hybrid AIS-GA for constrained optimization problems in mechanical engineering, *Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 1–6 June 2008, pp. 1455–1462. DOI:10.1109/CEC.2008.4630985.
18. Kaveh A., Talatahari S. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems, *Engineering Computations*, 2010, Vol. 27, No. 1, pp. 155–182.
19. Akay B., Karaboga D. Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization, *Journal of intelligent manufacturing*, 2012, Vol. 23, No. 4, pp. 1001–1014.
20. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 2014, Vol. 69, pp. 46–61.

ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ДЕТЕРМИНИЗАЦИИ

В статье рассмотрены существующие подходы к оптимизации (оптимальному проектированию) систем в условиях неопределенности. Дана точная постановка задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров целевой функции и ограничений. В связи с этим изложены математическая теория сравнения интервалов, включающая точное определение максимального и минимального интервалов, условия существования таких интервалов и алгоритмы их отыскания. Предложена идея решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности ее параметров. Эта идея основана на правилах математической теории сравнения интервалов, позволяющих заменить сравнение интервалов и выделение максимального и минимального интервала сравнением их нижних и верхних границ. На базе предложенной идеи сформулирован и обоснован метод детерминизации, позволяющий решить задачу условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров путем ее сведения к двум полностью определенным задачам оптимизации того же типа. Сформулирована и доказана теорема, определяющая решение задачи условной оптимизации в условиях интервальной неопределенности параметров через решения двух указанных полностью определенных задач оптимизации. Также сформулирована и доказана теорема, определяющая необходимое и достаточное условие существования решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности. Построен четырехшаговый алгоритм решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров, который реализует метод детерминизации. Приведен пример работы алгоритма; в качестве решаемой задачи выбрана интервальная задача о назначениях. Проведено сравнение изложенного подхода к решению задач условной оптимизации с неполностью определенными параметрами с другими методами решения таких задач (детерминированный, вероятностный и нечеткий). Указаны достоинства и недостатки различных методов. Подчеркнуто, что предложенный подход позволяет сводить оптимизацию неполностью определенных функций к оптимизации полностью определенных функций строго математически, а не эвристически, как это делается в других известных подходах.

Ключевые слова: оптимизация, неопределенность, оптимизация при интервальной неопределенности, метод детерминизации.

НОМЕНКЛАТУРА

x_1, \dots, x_n – вещественные независимые переменные;
 y – вещественная зависимая переменная;
 F, F_1, F_2 – детерминированные целевые функции;
 a, a_i, b, b_i – вещественные числа;
 Φ, Φ_1, Φ_2 – детерминированные функции ограничений;
 $\tilde{F} = [F_1, F_2]$ – интервальная целевая функция;
 $\tilde{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2]$ – интервальные функции ограничений;
 $\tilde{a} = [a_1, a_2], \tilde{b} = [b_1, b_2]$ – интервальные числа;
 $\tilde{p} = [p_1, p_2], \tilde{q} = [q_1, q_2]$ – интервальные параметры;
 \vee – символ дизъюнкции (взятия максимума);
 \wedge – символ конъюнкции (взятия минимума);
 \cap – символ пересечения множеств.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи оптимизации имеют огромное прикладное значение: на их основе строятся методы оптимального проектирования разнообразных систем – технических, экономических, социальных и т.д., обеспечивающие достижение наилучшего, в определенном смысле, результата работы создаваемой системы. В связи с этим к настоящему времени уже создано огромное число методов решения задач оптимизации, как универсальных, рассчитанных на применение к задачам различных классов, так и специализированных, позволяющих эффективно решать лишь отдельные узкие классы задач [1–6] (см. также работы автора последних лет [7–12]).

Но при всем различии существующих методов, они все обладают общим свойством – применимостью только

к тем задачам оптимизации, в которых оптимизируемая функция известна точно (детерминирована). Между тем, встречающиеся на практике задачи оптимизации и оптимального проектирования таковы, что их оптимизируемые функции обычно известны не точно, а с той или иной степенью неопределенности (недетерминированы). Это обычно вызывается тем, что 1) реальным процессам свойственна естественная неопределенность; 2) параметры большинства систем из-за погрешности вычислений (измерений) известны неточно; 3) параметры многих систем изменяются во времени.

В связи с этим, возникает проблема оптимизации неполностью определенных (недетерминированных) функций. Данная проблема достаточно сложна, по сравнению с традиционной оптимизацией полностью определенных (детерминированных) функций, поскольку для нее дополнительно необходимо: 1) обобщить понятие экстремума функции; 2) выяснить условия существования экстремума функции, связанные с ее недетерминированностью; 3) разработать специальные методы поиска экстремума таких функций.

Реально эта проблема еще сложнее, поскольку имеющаяся информация об оптимизируемой функции может быть не только неполностью определенной, но и неоднозначной, неточной, противоречивой и т.д. В такой ситуации некоторые авторы считают, что модели для описания сложных систем могут быть смысловыми, носящими содержательно-описательный, словесный характер. Такой взгляд представляется не вполне логичным. Действительно, математика, как известно, строится как полностью определенная, однозначная, точная и не-

противоречивая наука. Поэтому правильное применение математики к описанию сложных систем – неопределенных, неоднозначных, неточных противоречивых и т.д. – вполне может давать адекватные математические модели этих систем, лишённые неопределённости, неоднозначности, неточности и противоречивости. Для этого требуется всего лишь подобрать математический аппарат, который позволяет оперировать с неопределённостью и другими НЕ-свойствами исследуемой сложной системы так же точно и однозначно, как классическая математика оперирует с полностью определёнными системами.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать следующую ситуацию. Пусть, существует некоторая произвольная непрерывная функция n переменных

$$y = F(x_1, \dots, x_n), \quad (1)$$

причем все параметры (коэффициенты) ее явного представления известны точно и пусть она определена в области, определяемой системой ограничений

$$\Phi_i(x_1, \dots, x_n) \leq b_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (2)$$

Тогда относительно функции (1) можно сформулировать полностью определённую (детерминированную) задачу условной оптимизации

$$F(x_1, \dots, x_n) = \max, \text{ при } \Phi_i(x_1, \dots, x_n) \leq b_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (3)$$

Конечно, возможен и вариант задачи (3), где необходимо не максимизировать, а минимизировать функцию F . В современном математическом программировании есть множество методов эффективного решения задач (3), ориентирующихся на тип функций F и $\Phi_i, i = \overline{1, m}$.

Пусть теперь параметры $p_k, k = \overline{1, l}$ явного представления функции F известны не точно, а с точностью до интервалов возможных значений, т. е. имеют вид интервалов $\tilde{p}_k = [p_{k1}, p_{k2}]$. Далее, пусть аналогичным образом неточно заданы параметры q_s явного представления функций Φ_i в левых частях ограничений задачи, а также и параметры b_i в правых частях ограничений, т.е. $\tilde{q}_{si} = [q_{si1}, q_{si2}], s = \overline{1, t}, \tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}], i = \overline{1, m}$. Тогда функции F и $\Phi_i, i = \overline{1, m}$, также становятся интервальными (т. е. принимающими вид интервалов \tilde{F} и $\tilde{\Phi}_i, i = \overline{1, m}$), определяемыми с точностью до интервалов возможных значений, равно как и параметры $b_i, i = \overline{1, m}$ (т.е. принимающие вид интервалов $\tilde{b}_i, i = \overline{1, m}$). В итоге полностью определённая задача условной оптимизации (3) переходит в неполовностью определённую – интервальную задачу

$$\tilde{F}(x_1, \dots, x_n) = \max, \text{ при } \tilde{\Phi}(x_1, \dots, x_n) \leq \tilde{b}_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (4)$$

Конечно, возможен вариант задачи (4), где требуется не максимизировать, а минимизировать функцию \tilde{F} . Необходимо разработать методику решения оптимизационной задачи (4).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Есть различные подходы к поиску оптимума неполовностью определённых (недетерминированных) функций, различающиеся достоинствами и недостатками [13]. Первый из них – детерминированный – заключается в решении задачи оптимизации для определённых значений или сочетаний значений параметров оптимизируемой функции, взятых внутри заданных областей их неопределённости [13]. Можно взять наихудшее сочетание значений параметров внутри областей неопределённости (пессимистический подход) [13–16], их наилучшее сочетание (оптимистический подход) [17], центры областей неопределённости параметров (центральный подход) [18] и др. Основное достоинство подхода – простота интерпретации полученного решения, основной недостаток – слабо мотивированная ориентировка на какое-то одно значение (сочетание значений) параметров, которое на практике реализуется очень редко, что может обернуться неоправданной сложностью решения. Второй подход – вероятностный – состоит в решении задачи оптимизации для усреднённых (ожидаемых, в смысле математического ожидания) значений параметров оптимизируемой функции или для таких значений параметров, которые обеспечивают достаточно высокую вероятность получения оптимума [19–22]. Этот подход предполагает задание вероятностных распределений указанных параметров внутри областей их неопределённости. Основное достоинство этого подхода – ориентировка получаемого решения хотя и на одно, но зато наиболее часто встречающееся (наиболее подходящее для получения оптимума) значение (сочетание значений) параметров функции, недостаток – необходимость знания вероятностных распределений параметров, что на практике часто невозможно. Третий подход – нечеткий – идейно близок второму, но в нем вместо вероятностных распределений параметров неполовностью определённой функции, являющихся объективными характеристиками, используются нечеткие распределения параметров, получаемые экспертным путем, т.е. субъективно [12].

В наших работах [23–28] был предложен и детально описан применительно к различным оптимизационным задачам детерминизационный подход к поиску оптимума неполовностью определённых функций. Этот подход принципиально отличается от трех предыдущих тем, что оптимизация неполовностью определённой функции проводится с учетом всего множества возможных значений недетерминированных параметров функции.

Указанный подход позволяет для любой функции, неопределённости которой заключается в том, что ее параметры известны нам лишь с точностью до интервалов возможных значений, свести нахождение оптимума такого типа функции к нахождению одноименных оптимумов двух полностью определённых функций. Таким образом, для нахождения оптимума неполовностью определённых функций становится возможным применять многочисленные хорошо известные и эффективно работающие методы точного нахождения оптимума полностью определённых (детерминированных) функций. При этом собственно алгоритм нахождения оптимума неполовностью определённой (недетерминированной)

функции оказывается полностью определенным, однозначным, точным и непротиворечивым. Другой причиной выбора неопределенности именно интервального типа было то, что интервальные оценки неизвестных параметров систем наиболее просты и доступны для получения. В этом заключаются основные достоинства предложенного нами подхода к оптимизации неполностью определенных функций – метода детерминизации. Разумеется, у нашего метода есть и другие достоинства, а также и недостатки. Они подробно рассмотрены в п. 6.

В настоящей работе детерминизационный подход к оптимизации неполностью определенных функций излагается и обосновывается в наиболее общем виде, не зависящем от особенностей оптимизируемых функций.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$. Попробуем сравнить эти интервалы по величине, рассматривая их как интервальные числа. Первое, что приходит в голову, – сравнить интервалы \tilde{a} и \tilde{b} на основе отношений в отдельных парах вещественных чисел (a_i, b_j) , где $a_i \in \tilde{a}$, $b_j \in \tilde{b}$. Но такой подход сразу ведет к провалу, поскольку в общем случае, при произвольных интервалах \tilde{a} и \tilde{b} , одни пары чисел (a_i, b_j) будут находиться в отношении $a_i > b_j$, а другие – в противоположном отношении: $a_i < b_j$. Поэтому единственное, что остается, – реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая их как целое, не подлежащее дроблению на части. Этот путь был реализован автором в 1990-е годы. Ниже приводится краткое изложение разработанных методов [23–28].

Итак, в соответствии с полученными только что выводами, операции взятия максимума \vee и минимума \wedge двух произвольных интервалов $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ введем в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a} \vee \tilde{b} = \{a \vee b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \quad \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \{a \wedge b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (5)$$

Взятие максимума (минимума) двух интервалов \tilde{a} и \tilde{b} определяется по формулам (5) как нахождение максимума (минимума) двух точечных величин a и b , при условии, что эти величины пробегает все возможные значения соответственно из интервалов \tilde{a} и \tilde{b} . Теперь для того чтобы интервалы \tilde{a} и \tilde{b} можно было сравнить по величине, установив отношение $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо, во-первых, чтобы введенные операции \vee, \wedge над этими интервалами существовали, во-вторых, чтобы эти операции давали в результате один из операндов – \tilde{a} или \tilde{b} , и, в-третьих, чтобы эти две операции были согласованы, в том смысле, что если большим (меньшим) является один из интервалов, то меньшим (большим) является другой из них. Сформулированное условие сравнимости двух интервалов по величине является, очевидно, не только необходимым, но и достаточным.

К счастью, нетрудно доказать, что условие согласованности операций \vee и \wedge над интервалами выполняется

всегда, т.е. для любой пары интервалов (\tilde{a}, \tilde{b}) . Очевидно также, что всегда выполняется условие существования введенных операций вычисления максимума и минимума двух интервалов, причем результатом операции оказывается некоторый, вообще говоря, новый интервал, который может отличаться как от \tilde{a} , так и от \tilde{b} . Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости интервалов \tilde{a} и \tilde{b} является условие, по которому операции $\tilde{a} \vee \tilde{b}$ и $\tilde{a} \wedge \tilde{b}$ должны иметь результатом один из интервалов – \tilde{a} или \tilde{b} . Последняя формулировка условия сравнимости интервалов открывает возможность получения его в конструктивной форме, пригодной для практического применения. Основным результатом здесь формулируется следующим образом.

Теорема 1. Для того чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были сравнимы по величине (отношению \geq) и находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы границы этих интервалов подчинялись условиям

$$a_1 \geq b_1, \quad a_2 \geq b_2, \quad (6)$$

а для того чтобы они были сравнимы по величине (отношению \leq) и находились в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия

$$a_1 \leq b_1, \quad a_2 \leq b_2. \quad (7)$$

Эта теорема показывает, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} являются сравнимыми по отношению \geq или \leq (и находятся именно в этом отношении) только в том случае, когда в таком же отношении находятся их одноименные границы a_1, b_1 и a_2, b_2 . Иными словами, интервалы \tilde{a} и \tilde{b} находятся в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ только тогда, когда \tilde{a} сдвинут обеими границами вправо относительно \tilde{b} и находятся в противоположном отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ только тогда, когда интервал \tilde{a} сдвинут обеими границами влево относительно \tilde{b} .

Значение теоремы 1 заключается в том, что она сводит сравнение двух интервалов и выбор большего (меньшего) из них к сравнению одноименных границ этих интервалов, являющихся вещественными числами. Так решается проблема сравнения интервалов.

Теорема 2. Для того чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были не сравнимы по величине (по отношению \geq и \leq), т.е. не находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \quad \text{или} \quad (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \quad (8)$$

Эта теорема показывает, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} не сравнимы по отношению \geq и \leq только в том случае, когда один из них полностью «накрывает» другой. Значение теоремы 2 заключается в том, что она показывает суще-

ствование определенных случаев несравнимости интервалов по отношениям \geq и \leq , в отличие от вещественных чисел, которые всегда сравнимы по указанным отношениям. Несравнимость некоторых интервалов есть естественный результат того, что интервальные числа, в отличие от обычных вещественных чисел, задаются не точно, а с неопределенностью (число принимает некоторое значение в заданном интервале, но не уточняется, какое именно это значение). На основании теорем 1, 2 можно доказать следующие положения.

Теорема 3. Для того чтобы в системе интервалов $\tilde{a}(1)=[a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2)=[a_1(2), a_2(2)]$,... существовал максимальный интервал (который находится со всеми остальными интервалами в отношении \geq), необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} a_1(1) &\geq a_1(2), a_1(1) \geq a_1(3), \dots \\ a_2(1) &\geq a_2(2), a_2(1) \geq a_2(3), \dots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Конкретные условия (9) даны для случая, когда максимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что, очевидно, не ограничивает общности.

Теорема 4. Для того чтобы в системе интервалов $\tilde{a}(1)=[a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2)=[a_1(2), a_2(2)]$,... существовал минимальный интервал (который находится со всеми остальными интервалами в отношении \leq), необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} a_1(1) &\leq a_1(2), a_1(1) \leq a_1(3), \dots \\ a_2(1) &\leq a_2(2), a_2(1) \leq a_2(3), \dots \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Аналогично теореме 3 условия (10) записаны для случая, когда минимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что не ограничивает общности.

Теоремы 3 и 4 показывают, что интервал является максимальным (минимальным) в системе интервалов только в том случае, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница – среди нижних границ всех интервалов – и верхняя граница – среди верхних границ всех интервалов.

Теперь мы можем легко описать принцип детерминизации. В интервальной задаче (4) целевая функция $\tilde{F}(x_1, \dots, x_n)$, функции $\tilde{\Phi}_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = \overline{1, m}$, в левых частях ограничений и параметры \tilde{b}_i , $i = \overline{1, m}$, в их правых частях являются интервальными и поэтому могут быть записаны в виде интервалов

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x_1, \dots, x_n) &= [F_1(x_1, \dots, x_n), F_2(x_1, \dots, x_n)], \\ \tilde{\Phi}_i(x_1, \dots, x_n) &= [\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n), \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n)], \quad i = \overline{1, m}, \\ \tilde{b}_i &= [b_{i1}, b_{i2}], \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (11)$$

После соответствующих замен сформулированную ранее задачу (4) можно переписать в явном интервальном виде

$$\begin{aligned} [F_1(x_1, \dots, x_n), F_2(x_1, \dots, x_n)] &= \max, \\ [\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n), \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n)] &\leq [b_{i1}, b_{i2}], \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (12)$$

который поддается решению. Действительно, согласно теореме 3 интервальное уравнение в (12) можно записать в виде эквивалентной пары обычных (детерминированных) уравнений

$$F_1(x_1, \dots, x_n) = \max, \quad F_2(x_1, \dots, x_n) = \max. \quad (13)$$

Далее, согласно приведенному выше утверждению теоремы 1 систему интервальных неравенств в условии оптимизационной задачи (12) можно записать в виде эквивалентной системы обычных (детерминированных) неравенств

$$\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) \leq b_{i1}, \quad \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) \leq b_{i2}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

Соединяя пару уравнений оптимизации (13) с системой неравенств-ограничений (14) получим 2 детерминированные (полностью определенные) задачи условной оптимизации вида (3), при этом первую из новых задач назовем нижней граничной задачей исходной интервальной задачи (4), а вторую – ее верхней граничной задачей:

$$F_1(x_1, \dots, x_n) = \max, \quad \left. \begin{aligned} \Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i1}, \quad i = \overline{1, m}, \\ \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i2}, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$F_2(x_1, \dots, x_n) = \max, \quad \left. \begin{aligned} \Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i1}, \quad i = \overline{1, m}, \\ \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i2}, \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из выполненного нами построения следует, что пара детерминированных задач условной оптимизации (15), (16), рассматриваемых в совокупности, эквивалентна исходной интервальной задаче (4). Таким образом, для получения решения интервальной задачи (4) надо решить ее нижнюю (15) и верхнюю (16) граничные задачи, выделив соответствующие два множества точек решений, а затем взять какую-нибудь одну точку из пересечения этих множеств, которая и будет точкой решения интервальной задачи (4). В общем случае решения нижней (15) и верхней (16) граничных задач имеют вид $\{M_H(x), F_{1,\max}\}$, $\{M_B(x), F_{2,\max}\}$, где $M_H(x)$, $M_B(x)$ – множества точек решений $x = (x_1, \dots, x_n)$ нижней и верхней граничной задачи, $F_{1,\max}$, $F_{2,\max}$ – максимальные значения целевых функций этих задач. Так что решение x^* , \tilde{F}_{\max} интервальной задачи (4) составляется из решений ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач в виде

$$\{x^* \in M_H(x) \cap M_B(x), \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\}. \quad (17)$$

В качестве точки решения x^* в выражении (17) берется любая точка из пересечения множеств точек решения нижней (15) и верхней (16) граничных задач, а в качестве максимального значения целевой функции \tilde{F}_{\max} – интервал от максимального значения целевой функции нижней граничной задачи $F_{1,\max}$ до максимального значения целевой функции верхней задачи $F_{2,\max}$. Изложенные в данном разделе результаты можно суммировать в виде теоремы.

Теорема 5. Множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ интервальной задачи условной оптимизации (4) равно пересечению множеств точек решения ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач. Максимальное значение целевой функции задачи 4 равно интервалу, нижняя граница которого равна максимальному значению целевой функции нижней граничной задачи, а верхняя граница – максимальному значению целевой функции верхней граничной задачи.

Из теоремы 5 вытекает нижеследующая

Теорема 6. Для того чтобы интервальная задача условной оптимизации (4) имела решение, необходимо и достаточно, чтобы пересечение множеств точек решения ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач было непусто.

Основное преимущество нашего подхода к решению интервальной задачи условной оптимизации заключается в возможности использования для этого традиционных, хорошо разработанных методов решения детерминированных задач условной оптимизации. Основанный на этом подходе метод решения интервальной задачи условной оптимизации естественно назвать методом детерминизации, поскольку он сводит решение недетерминированной задачи (4) к решению двух детерминированных задач (15) и (16).

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Из изложенного в п. 3 следует, что для решения интервальной задачи условной оптимизации (4) методом детерминизации необходимо действовать по следующему алгоритму.

Шаг 1. Используя формулы интервальной математики, выражающие результаты элементарных преобразований интервалов [18]

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ [a_1, a_2] - [b_1, b_2] &= [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k[a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \quad [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] = [\min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j)]; \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1], \end{aligned} \quad (18)$$

представляем целевую функцию \tilde{F} и функции ограничений $\tilde{\Phi}_i$ задачи (4) в интервальной форме. Так же представляем параметры b_i в ограничениях. Полученные выражения имеют вид (11).

Шаг 2. Используя интервальные представления целевой функции, функции ограничений и параметров, полученные на шаге 1, формируем нижнюю (15) и верхнюю (16) граничные задачи интервальной задачи условной оптимизации (4).

Шаг 3. Используя подходящие методы решения детерминированных задач условной оптимизации, получаем решения нижней $\{M_n(x), F_{1,max}\}$ и верхней $\{M_b(x), F_{2,max}\}$ граничных задач. Здесь $M_n(x)$ – множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ нижней граничной задачи, в которых ее целевая функция F_1 достигает максимума $F_{1,max}$, а $M_b(x)$ – множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ верхней граничной задачи, в которых целевая функция F_2 достигает $F_{2,max}$.

Шаг 4. Выбирая в качестве точки решения задачи (4) любую точку x^* из пересечения множеств $M_n(x)$ и $M_b(x)$ и беря в качестве нижней границы максимума \tilde{F}_{max} интервальной целевой функции \tilde{F} задачи (4) максимум $F_{1,max}$ целевой функции нижней граничной задачи, а в качестве верхней границы \tilde{F}_{max} интервальной целевой функции \tilde{F} задачи (4) – максимум $F_{2,max}$ целевой функции верхней граничной задачи, получаем все решение задачи (4) в виде (17).

Изложенный алгоритм, как видно из приведенного выше его описания, дает решение интервальной задачи условной оптимизации (4) во всех случаях, когда пересечение множеств точек решения ее нижней и верхней граничных задач непусто. Но из теоремы 6 следует, что указанное пересечение непусто только тогда, когда интервальная задача условной оптимизации (4) имеет решение. Таким образом, предложенный алгоритм дает решение интервальной задачи условной оптимизации (4) во всех случаях, когда это решение существует.

Пример (интервальная задача о назначениях). Есть 3 работы и 3 исполнителя – кандидата на работы. Заданы издержки $\tilde{a}_{ij} = [a_{1,ij}, a_{2,ij}]$ выполнения j -й работы i -м исполнителем ($i, j = \overline{1,3}$), представляющие собой интервальные величины и составляющие интервальную матрицу издержек $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\| = \|[a_{1,ij}, a_{2,ij}]\| = [A_1, A_2]$, где $A_1 = \|a_{1,ij}\|$ и $A_2 = \|a_{2,ij}\|$ есть нижняя и верхняя граничные матрицы издержек. Надо распределить работы так, чтобы каждый исполнитель был занят выполнением ровно одной работы, а суммарные издержки на все работы были минимальны.

Введем множество неизвестных булевых матриц значений $X = \|x_{ij}\|$, $x_{ij} \in \{0,1\}$, где $x_{ij} = 1$, если i -й исполнитель выполняет j -ю работу, и $x_{ij} = 0$ в противном случае. Тогда имеем

$$\tilde{F}(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tilde{a}_{ij} x_{ij} = \min,$$

$$\text{при } \Phi_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1,3},$$

$$\Phi_2(x_{ij}) \equiv \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1,3}.$$

Эта задача представляет собой частный случай общей интервальной задачи (4). Поэтому для ее решения мы можем применить 4-шаговый алгоритм, описанный выше.

Шаг 1. С помощью формул (18) представляем целевую функцию \tilde{F} нашей оптимизационной задачи в интервальной форме

$$\tilde{F}(x_{ij}) \equiv \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{1,ij} x_{ij}, \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{2,ij} x_{ij} \right].$$

Представлять в интервальной форме функции $\tilde{\Phi}_1(x_{ij}), \tilde{\Phi}_2(x_{ij})$ ограничений задачи, равно как и параметры в их правых частях не нужно, т. к. здесь нет интервальных параметров.

Шаг 2. Используя полученные на шаге 1 представления, формируем нижнюю F_1 и верхнюю F_2 граничные задачи решаемой интервальной задачи

$$F_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{1,ij} x_{ij} = \min,$$

при $\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, j = \overline{1,3}, \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, i = \overline{1,3},$

$$F_2(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{2,ij} x_{ij} = \min,$$

при $\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, j = \overline{1,3}, \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, i = \overline{1,3}.$

Шаг 3. Решаем нижнюю и верхнюю граничные задачи интервальной задачи, полученные только что на шаге 2 алгоритма. Для определенности принимаем следующее конкретное значение интервальной матрицы издержек

$$\tilde{A} = [A_1, A_2],$$

$$\text{где } A_1 = \|a_{1,ij}\| = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{vmatrix}, \quad A_2 = \|a_{2,ij}\| = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 3 \\ 3 & 4 & 4 \end{vmatrix}.$$

Имеется всего шесть различных значений матриц неизвестных $X = \|x_{ij}\|$, удовлетворяющих ограничениям решаемой задачи. Поэтому в данном случае решение легко находится перебором на множестве этих матриц. В результате получаем решение нижней граничной задачи в виде $\{M_H(x), F_{1,\min}\}$, где множество решений M_H

$$M_H(x) = \left\{ X_{1a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, X_{1b} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, X_{1c} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, X_{1d} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \right\},$$

а достигнутое минимальное значение целевой функции $F_{1,\min} = 5$. Далее, совершенно аналогично получаем решение верхней граничной задачи $\{M_B(x), F_{2,\min}\}$. Именно, множество решений

$$M_B(x) = \left\{ X_{2a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, X_{2b} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \right\},$$

а соответствующее достигнутое минимальное значение целевой функции верхней граничной задачи для исходной задачи составляет $F_{2,\min} = 9$.

Шаг 4. Находим пересечение множеств решений нижней граничной $M_H(x)$ и верхней граничной $M_B(x)$

задач. Оно состоит из одной матрицы назначений

$$X^* = X_{1b} = X_{2a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

которая и есть решение всей задачи. Достигнутый на этом решении минимум заданной интервальной целевой функции составляет $\tilde{F}_{\min} = [F_{1,\min}, F_{2,\min}] = [5, 9]$.

Оптимальное решение поставленной задачи о назначении 3 исполнителей на 3 работы таково: 1-й исполнитель назначается на 1 работу, 2-й – на 3 работу, а 3-й – на 2 работу. При этом издержки оцениваются минимальным интервалом возможных значений, равным [5, 9].

Другие примеры решения оптимизационных задач с интервальными параметрами с использованием изложенного алгоритма даны в [7–9, 15, 19].

5 ОБСУЖДЕНИЕ

Как уже говорилось во введении, проблема оптимизации непольностью определенных функций, по сравнению с традиционной оптимизацией полностью определенных функций, требует дополнительно 1) обобщения понятия экстремума функции; 2) выяснения условий существования экстремума функций, связанных с ее неполной определенностью; 3) разработки специальных методов поиска экстремума таких функций. Именно по этой схеме разработан предлагаемый в статье детерминизационный подход к оптимизации. Конкретно, обобщение понятия экстремума функции на случай непольностью определенных (интервальных) функций дано в п. 3 (формулы (5)). Далее, условия существования (несуществования) экстремума интервальной функции даны в теоремах 1–4 того же п. 3. И, наконец, в п. 3 разработан специальный метод поиска экстремума интервальной функции. Необходимость проведения всей этой работы представляется очевидной. Действительно, оптимизация полностью определенных функций основана на сравнении точно определенных вещественных чисел, с выделением большего и меньшего из них, причем на числовой оси большее число сдвинуто вправо относительно меньшего. Однако для оптимизации непольностью определенных функций такой подход не работает, поскольку неточно определенные числа (например, интервальные), в отличие от точно определенных вещественных чисел, в общем случае не находятся в отношении «сдвинуто вправо (влево) на вещественной оси» и потому не могут сравниваться непосредственно, с выделением большего и меньшего. Вследствие этого для таких функций и приходится обобщать понятие экстремума. Далее, непольность информации, которой характеризуются непольностью определенные числа и функции, при достижении некоторого достаточно высокого уровня может привести к несравнимости таких чисел и невозможности выделить из них большее и меньшее и, как следствие, – к отсутствию экстремума таких функций. В связи с этим и возникает необходимость нахождения условий существования экстремума непольностью определенных функций. Наконец, вследствие иного, более общего, чем для полностью определенных функций, понятия экстремума непольностью определенной функции и возможности несуществования этого экстремума, вызванной неполнотой информации, приходится разрабатывать специальные методы отыскания экстремума таких функций. Важно понимать, что невозможность в определенных случаях найти экстремум не-

полностью определенной функции с помощью любого адекватного, в частности, предложенного в статье, алгоритма не связана с качеством алгоритма, а является следствием объективной реальности, а именно, отсутствия в указанных случаях экстремума вследствие недостатка информации о функции.

В тех же случаях, когда информация о функции достаточна и потому ее экстремум существует, предложенный алгоритм позволяет найти этот экстремум (см. п. 4). Требовать от алгоритма большего, очевидно, нельзя.

Охарактеризуем теперь другие существующие подходы к оптимизации неполностью определенных функций. Кратко об основных достоинствах и недостатках этих подходов уже говорилось во введении. Рассмотрим вопрос подробнее. Начнем с детерминированного подхода. При этом подходе исходная задача оптимизации неполностью определенной функции фактически заменяется другой задачей – оптимизации полностью определенной функции. Причем конструирование этой новой задачи путем выбора определенных значений параметров внутри областей неопределенности параметров функции исходной задачи производится на основе чисто эвристических соображений и не опирается ни на какие математически ясные обобщения понятия экстремума на случай неполностью определенных функций. Вследствие этого новая задача оказывается, как правило, математически неэквивалентной исходной задаче, а интерпретация ее решения в терминах исходной задачи – проблематичной. Кроме того, из-за сложности некоторых критериев оптимизации, используемых в новой задаче (\max, \min), трудоемкость алгоритмов поиска экстремума неполностью определенных функций при детерминированном подходе может оказаться высокой. Зато при этом подходе обычно не возникает проблемы выяснения условий существования экстремума функций, т.к. полностью определенные функции практически всегда имеют экстремум.

Теперь о вероятностном подходе. При первом варианте данного подхода исходная задача оптимизации неполностью определенной функции заменяется, как и в случае детерминированного подхода, другой задачей – оптимизации полностью определенной функции, которая теперь получается из исходной функции путем замены ее случайных параметров их математическими ожиданиями (центрами). Сразу ясно, что эта новая задача неэквивалентна исходной задаче в еще большей степени, чем при детерминированном подходе, поскольку она, не опираясь ни на какие обобщения понятия экстремума для неполностью определенных функций, не учитывает не только неопределенность возможных значений параметров указанной функции, но и случайный характер реализации конкретных значений параметров функции на практике. Во втором варианте вероятностного подхода исходная задача оптимизации неполностью определенной функции с интервальными параметрами заменяется задачей оптимизации неполностью определенной функции со случайными параметрами. Последние получают из интервальных параметров исходной задачи принятием гипотезы о равномерном распределении значений параметров внутри своих интервалов. Принятие указанной гипотезы сразу упрощает выбор экстремального интервала. Так, для выбора большего из двух интервалов \tilde{a} и \tilde{b} достаточно лишь вычислить вероятности $P(\tilde{a} > \tilde{b})$ и $P(\tilde{b} > \tilde{a})$ и взять тот интервал, для которого вероятность превышения им второго интервала больше. Этот подход гарантирует существование решения, полученного с помощью гипотезы мо-

дельной задачи оптимизации функции со случайными параметрами. Но беда заключается в том, что модельная задача неэквивалентна исходной задаче оптимизации функции с интервальными параметрами, так как одно лишь задание неопределенности функции в форме интервалов возможных значений ее параметров не предполагает задания какой-то дополнительной информации, например, в виде вероятностных распределений внутри интервалов. Все, что ранее было сказано о вероятностном подходе, можно повторить для нечеткого подхода, с заменой термина «вероятностное распределение параметров неполностью определенной функции» термином «нечеткое распределение параметров».

На практике для решения разнообразных задач оптимизации неполностью определенных функций, в зависимости от условий, могут применяться различные подходы. В общем случае рекомендуется начинать с детерминизационного подхода, поскольку он базируется на точном определении понятия максимума и минимума неопределенного числа (интервала), что упрощает интерпретацию полученного решения и делает его более прозрачным. Если детерминизационный подход не приводит к решению, вследствие недостаточной информации об оптимизируемой функции, целесообразно эту информацию пополнить путем сужения интервалов возможных значений параметров этой функции с помощью дополнительных измерений, наблюдений, привлечения более квалифицированных экспертов, после чего снова применить данный подход. Если и это не помогло получить решение, рекомендуется перейти к использованию остальных подходов. В первую очередь, целесообразно попытаться применить вероятностный подход, который достаточно прост в реализации. При этом надо иметь в виду, что используемые в этом подходе вероятностные распределения параметров оптимизируемой неполностью определенной функции должны быть известны с достаточной точностью, так как в противном случае найденное предположительно оптимальное значение функции может оказаться далеким от настоящего оптимума. Надо еще учитывать, что при вероятностном подходе получение оптимума функции вообще строго не гарантируется, а лишь «обещается» с определенной вероятностью, притом не обязательно близкой к единице, что не всегда приемлемо. Поэтому на практике часто применяют детерминированный подход к оптимизации неполностью определенных функций. Этот подход, в отличие от детерминизационного подхода, всегда обеспечивает существование оптимума неполностью определенной функции, и, в отличие от вероятностного подхода, гарантирует получение этого оптимума. К сожалению, при этом подходе, как уже говорилось ранее, вследствие преобразования исходной неполностью определенной функции в полностью определенную (детерминированную) новая задача оптимизации оказывается неэквивалентна исходной, а интерпретация ее решения в терминах исходной задачи проблематичной. Например, выбор минимального из двух интервалов $\tilde{a} = [4, 5]$, $\tilde{b} = [3, 15]$ с помощью детерминированного подхода по критерию оптимальности «нижняя граница интервала минимальна» дает решение $\min(\tilde{a}, \tilde{b}) = \tilde{b} = [3, 15]$. Однако это решение невозможно интерпретировать практически, поскольку оно противоречит эвристическим представлениям о проблеме. Так, любой автомобилист уверенно предпочтет как более экономную машину с расходом топлива от 4 до 5 л на 100 км машине с расходом топлива от 3 до 15 л!

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье показано, что проблема оптимизации неполностью определенных функций достаточно просто разрешима, если указанную неопределенность задавать в интервальной форме и использовать при этом конструктивную теорию сравнения величин интервалов, сводящую это сравнение к сравнению одноименных границ интервалов. Тем самым задача нахождения оптимума неполностью определенной функции сводится к более простой задаче отыскания одноименного оптимума двух полностью определенных (детерминированных) функций. Наш подход (его естественно назвать детерминизацией) примечателен тем, что позволяет вполне строго свести оптимизацию неполностью определенных функций к хорошо известным и эффективным методам оптимизации полностью определенных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Д. Б. Задачи и методы линейного программирования / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольдштейн. – М. : Советское радио, 1964. – 735 с.
2. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио, 1964. – 390 с.
3. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума / Д. Дж. Уайлд. – М. : Наука, 1967. – 268 с.
4. Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – М. : Наука, 1969. – 280 с.
5. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
6. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ / В. И. Левин. – М. : Наука, 1987. – 304 с.
7. Левин В. И. Моделирование задач оптимизации в условиях интервальной неопределенности / В. И. Левин // Известия Пензенского гос. пед. ун-та. Серия «Физико-математические и технические науки». – 2011. – № 26. – С. 589–595.
8. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Автоматика и вычислительная техника. – 2012. – № 4. – С. 157–163.
9. Левин В. И. Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2012. – № 4. – С. 52–59.
10. Левин В. И. Оптимальное проектирование в условиях неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Онтология проектирования. – 2013. – № 3 (9). – С. 41–52.
11. Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2014. – № 5. – С. 14–21.
12. Левин В. И. Оптимизация в условиях неопределенности / В. И. Левин // Вестник Тамбовского ун-та. Серия «Естественные и технические науки». – 2014. – Т. 19. Вып. 3. – С. 844–851.

13. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1975. – 616 с.
14. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function / M. Libura // Control and Cybernetics. – 1980. – Vol. 9, № 4. – P. 189–202.
15. Тимохин С. Г. О задачах линейного программирования в условиях неточных данных / С. Г. Тимохин, А. В. Шапкин, // Экономика и математические методы. – 1981. – Т. 17, № 5. – С. 955–963.
16. Рошин В. А. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования / В. А. Рошин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // Кибернетика. – 1989. – № 2. – С. 42–46.
17. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования / Н. В. Семенова // Кибернетика. – 1984. – № 5. – С. 25–31.
18. Вошинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров. – М. : Изд-во МЭИ, 1989. – 224 с.
19. Ащепков Л. Т. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления / Л. Т. Ащепков, Д. В. Давыдов. – М. : Наука, 2006. – 285 с.
20. Давыдов Д. В. Интервальные методы и модели принятия решений в экономике. Диссерт. докт. экон. наук / Д. В. Давыдов. Дальневосточный гос. ун-т. – Владивосток, 2009. – 343 с.
21. Островский Г. М. Технические системы в условиях неопределенности. Анализ гибкости и оптимизация / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. : Бином, 2008. – 325 с.
22. Островский Г. М. Оптимизация технических систем / Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева. – М. : Кнорус. 2012. – 252 с.
23. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 7. – С. 97–106.
24. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 7. – С. 111–122.
25. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование / В. И. Левин // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – № 6. – С. 92–103.
26. Левин В. И. Оптимизация расписаний в системах с неопределенными временами обработки. I, II / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1995. – № 2. – С. 99–110; № 3. – С. 106–116.
27. Левин В. И. Задача трех станков с неопределенными временами обработки // Автоматика и телемеханика / В. И. Левин. – 1996. – № 1. – С. 109–120.
28. Левин В. И. Интервальная модель общей задачи линейного программирования. Однородный случай / В. И. Левин // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. – 1998. – Т. 3. – № 4. – С. 401–407.

Статья поступила в редакцию 23.09.2015.

После доработки 16.07.2015

Левин В. И.

Д-р техн. наук, профессор кафедры математики Пензенского государственного технологического университета, Пенза, Россия

ОПТИМІЗАЦІЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МЕТОДОМ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ

У статті розглянуті існуючі підходи до оптимізації (оптимального проектування) систем в умовах невизначеності. Дана точна завдання умовної оптимізації при інтервальної невизначеності параметрів цільової функції і обмежень. У зв'язку з цим викладені математична теорія порівняння інтервалів, що включає точне визначення максимального і мінімального інтервалів, умови існування таких інтервалів і алгоритми їх відшукання. Запропонована ідея рішення задачі умовної оптимізації при інтервальної невизначеності її параметрів. Ця ідея заснована на правилах математичної теорії порівняння інтервалів, що дозволяють замінити порівняння інтервалів і виділення максимального і мінімального інтервалу порівнянням їх нижніх і верхніх меж. На базі запропонованої ідеї сформульовані і обгрунтований метод детермінізації, що дозволяє вирішити задачу умовної оптимізації при інтервальної невизначеності параметрів шляхом її зведення до двом повністю певним завданням оптимізації того ж типу. Сформульована і доведена теорема, визначальна рішення задачі умовної оптимізації в умовах інтервальної невизначеності параметрів через рішення двох зазначених повністю певних завдань оптимізації. Також сформульована і доведена теорема, визначальна необхідна і достатня умова існування розв'язку задачі

умовної оптимізації при інтервальній невизначеності. Побудований чотирехшаговий алгоритм вирішення задачі умовної оптимізації при інтервальній невизначеності параметрів, який реалізує метод детермінізації. Наведено приклад роботи алгоритму; в якості розв'язуваної задачі обрана інтервальна задача про призначення. Проведено порівняння викладеного підходу до вирішення задачі умовної оптимізації з неповністю визначеними параметрами з іншими методами вирішення таких завдань (детермінований, імовірнісний і нечіткий). Вказані достоїнства і недоліки різних методів. Підкреслено, що запропонований підхід дозволяє зводити оптимізацію неповністю певних функцій до оптимізації повністю певних функцій строго математично, а не евристично, як це робиться в інших відомих підходах.

Ключові слова: оптимізація, невизначеність, оптимізація при інтервальній невизначеності, метод детермінізації.

Levin V. I.

Dr Sc., Professor of Mathematical Department of Penza State Technological University, Penza, Russia

THE OPTIMIZATION IN CONDITION OF UNCERTAINTY BY DETERMINATION METHOD

The existing approaches to the optimization (optimal design) of systems under uncertainty are considered. An exact formulation of problem of constrained optimization under interval uncertainty of the parameters of the objective function and constraints is given. In this connection the mathematical theory of comparison of intervals is set out, including a precise definition of the maximal and minimal intervals, conditions for existence of such intervals and algorithms for finding them. Idea of solving constrained optimization problems under interval uncertainty of its parameters is proposed. This idea is based on the rules of the mathematical theory of comparison of intervals which allows replace the comparison of intervals and determination of maximal and minimal interval by comparing their lower and upper bounds. On basis of the proposed idea the determination method which allows solve the problem of constrained optimization under interval uncertainty parameters by reducing it to two entirely certain optimization problems of the same type is formulated and proved. We formulate and prove a theorem that defines the solution of the problem of constrained optimization under interval uncertainty of parameters through solutions of two fully certain optimization problems. Also the theorem that defines the necessary and sufficient condition for existence of a solution of constraint optimization under interval uncertainty is formulated and proved. The algorithm of solving constrained optimization under interval uncertainty parameters that implements a method of determination is constructed and consists of 4 steps. The example of the algorithm is given. The interval assignment task is selected as a problem to be solved is selected. A comparison of our approach to solving constrained optimization problems with incompletely defined parameters with other methods for solving such problems (deterministic, probabilistic and fuzzy) is done. Advantages and disadvantages of different methods are listed. It is emphasized that the proposed in the article approach allows us to reduce the optimization of incompletely specified functions to fully optimize certain functions strictly mathematically rather than heuristically, as is done in well-known approaches.

Keywords: optimization, uncertainty, optimization with interval uncertainty, determination.

REFERENCES

- Judin D. B., Goldshtein E.G. Zadachi i metody lineinogo programmirovaniya. Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 735 p.
- Ventcel' E. S. Vvedenie v issledovanie operatsiy. Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 390 p.
- Wilde D.J. Metody poiska ekstremuma. Moscow, Nauka, 1967, 268 p.
- Korbut A. A., Finkelshtein Yu. Yu. Diskretnoe programmirovaniye. Moscow, Nauka, 1969, 280 p.
- Moiseev N. N., Ivanilov Yu. P., Stolyarova E. M. Metody optimizatsii. Moscow, Nauka, 1978, 352 p.
- Levin V. I. Strukturno-logicheskie metody issledovaniya slozhnykh sistem s primeneniem EVM. Moscow, Nauka, 1987, 304 p.
- Levin V. I. Modelirovaniye zadach optimizatsii v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti, *Izvestiya Penzenskogo gos. ped. un-ta. Seriya «Fiziko-matematicheskie i tehnikheskie nauki»*, 2011, No. 26, pp. 589–595.
- Levin V. I. Optimizatsiya v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti. Metod determinizatsii // *Avtomatika i vychislitel'naya tehnika*, 2012, No. 4, pp. 157–163.
- Levin V. I. Metody optimizatsii sistem v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti parametrov, *Informatsionnye tehnologii*, 2012, No. 4, pp. 52–59.
- Levin V. I. Optimalnoye proektirovaniye v usloviyakh neopredelennosti. Metod determinizatsii, *Ontologiya proektirovaniya*, 2013, No. 3 (9), pp. 41–52.
- Levin V. I. Metodologiya optimizatsii v usloviyakh neopredelennosti metodom determinizatsii, *Informatsionnye tehnologii*, 2014, No. 5, pp. 14–21.
- Levin V. I. Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti, *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Estestvennye i tehnikheskie nauki*, 2014, Vol. 19, No. 3, pp. 844–851.
- Pervozvanskiy A. A. Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom. Moscow, Nauka, 1975, 616 p.
- Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function, *Control and Cybernetics*, 1980, Vol. 9, No. 4, pp. 189–202.
- Timohin S. G., Shapkin A. V. O zadachah lineinogo programmirovaniya v usloviyakh netochnykh dannykh, *Ekonomika i matematicheskie metody*, 1981, No. 5, Vol. 17, pp. 955–963.
- Roschin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Voprosy resheniya i issledovaniya odnogo klassa zadach netochnogo celochislennogo programmirovaniya, *Kibernetika*, 1989, No. 2, pp. 42–46.
- Semenova N. V. Reshenie odnoy zadachi obobshchennogo celochislennogo programmirovaniya, *Kibernetika*, 1984, No. 5, pp. 25–31.
- Voshhinin A. P., Sotirov G. R. Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti. Moscow, Izd-vo MEI, 1989, 224 p.
- Ashhepkov L. T., Davydov D. V. Universalnye resheniya intervalnykh zadach optimizatsii i upravleniya. Moscow, Nauka, 2006, 285 p.
- Davydov D. V. Intervalnye metody i modeli prinjatiya resheniy v ekonomike. Dissert. dokt. ekon. nauk. Vladivostok, Dalnevostochniy gos. un-t., 2009, 343 p.
- Ostrovskiy G. M., Volin Yu. M. Tehnikheskie sistemy v usloviyakh neopredelennosti. Analiz gibkosti i optimizatsiya. Moscow, Binom, 2008, 325 p.
- Ostrovskiy G. M., Ziyatdinov N. N., Lapteva T. V. Optimizatsiya tehnikheskikh sistem. Moscow, Knorus, 2012, 252 p.
- Levin V. I. Diskretnaya optimizatsiya v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti, *Avtomatika i telemekhanika*, 1992, No. 7, pp. 97–106.
- Levin V. I. Bulevo lineinoe programmirovaniye s intervalnymi koeffitsientami, *Avtomatika i telemekhanika*, 1994, No. 7, pp. 111–122.
- Levin V. I. Intervalnoe diskretnoe programmirovaniye, *Kibernetika i sistemnyy analiz*, 1994, No. 6, pp. 92–103.
- Levin V. I. Optimizatsiya raspisaniy v sistemah s neopredelennymi vremenami obrabotki. I, II, *Avtomatika i telemekhanika*, 1995, No. 2, pp. 99–110; No. 3, pp. 106–116.
- Levin V. I. Zadacha trekh stankov s neopredelennymi vremenami obrabotki, *Avtomatika i telemekhanika*, 1996, No. 1, pp. 109–120.
- Levin V. I. Intervalnaya model obschey zadachi lineinogo programmirovaniya. Odnorodnyy sluchai, *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tehnikheskie nauki*, 1998, Vol. 3, No. 4, pp. 401–407.

СПОСІБ ПІДТРИМАННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОПИТУ АКТОРІВ СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ НА КОНТЕНТ

Сучасні соціальні інтернет-сервіси є новітньою віртуальною платформою, яка забезпечує онлайн комунікацію між учасниками відповідних віртуальних спільнот. Популярність соціальних інтернет-сервісів, окрім усіх їх позитивних комунікаційних можливостей, породжує низку потенційних загроз інформаційній безпеці особи, суспільства, держави. Зокрема, особливо небезпечними є загрози, які спрямовуються зловмисниками на маніпулювання суспільною свідомістю. При цьому явища соціальної комунікації, які виникають внаслідок взаємодії акторів, характеризуються непрогнозованістю процесів. Це призводить до виникнення стану некерованого хаосу, який має безпосереднє віддзеркалення в оффлайні. З метою забезпечення керованості такими процесами у статті запропоновано використати концепцію синергетичного управління взаємодією акторів у соціальних інтернет-сервісах. Синергетичне управління, яке синтезується в результаті, забезпечує підвищення стійкості віртуальних спільнот до деструктивних впливів у розрізі управління попитом акторів на контент у соціальних інтернет-сервісах. На основі обраного динамічного інваріанту показано можливість забезпечення протікання у віртуальних спільнотах процесів керованої самоорганізації акторів для переходу системи у керований підконтрольний стан. Обраний у статті атрактор враховує базові особливості комунікації акторів, такі як зміна в часі цінності контенту та забезпечення досягнення поставленої мети від взаємодії акторів віртуальної спільноти у точці сплеску синергетичного ефекту. У результаті впливу синтезованого синергетичного управління на інваріантному різноманітті реалізується редукція ступенів свободи нелінійної динамічної системи – процесу взаємодії. Як наслідок, спрощується процес штучно-керованого підтримання заданого рівня попиту акторів і забезпечується вдалий старт нових брендів.

Ключові слова: соціальні інтернет-сервіси, взаємодія акторів, попит на контент, динамічний хаос, синергетичне управління, атрактор, інформаційна безпека.

НОМЕНКЛАТУРА

a – показник зміни швидкості попиту акторів у СІС на відповідний контент;

b – показник зміни конкуренції акторів у СІС на публікацію контенту, аналогічного за сутністю та змістом;

c – показник зміни швидкості пропозиції з надання акторам взаємодії в СІС відповідного контенту;

ϵ_1 – коефіцієнт регуляризації попиту акторам СІС на публікацію контенту, аналогічного за змістом;

ϵ_2 – коефіцієнт регуляризації конкуренції акторів СІС на публікацію аналогічного контенту;

T_0 – час, за який досягається заданий рівень зацікавленості акторів;

$u(x, y)$ – синергетичне управління взаємодією акторів у СІС, що реалізується через зворотний зв'язок;

V – функція Ляпунова;

$x(t)$ – процес, що описує попит акторів у СІС на відповідний контент для досліджуваної віртуальної спільноти;

$(x_D; y_D)$ – фазові координати точки сплеску синергетичного ефекту;

$y(t)$ – процес, що описує пропозицію з надання деякого контенту;

$\Psi_D(x, y)$ – заданий параметр порядку, атрактор, який враховує природні особливості взаємодії акторів СІС;

СІС – соціальні інтернет-сервіси.

ВСТУП

Роль СІС в процесі становлення громадянського суспільства постійно зростає. СІС як електронний засіб масової комунікації виступає ефективним інструментом формування суспільної думки з багатьох актуальних питань. Наприклад, СІС, при їх ефективному використанні забезпечують вдалий старт багатьох сучасних бізнес-проектів [1–5]. Збільшення кількості

потенційних загроз інформаційній безпеці, ускладнення процесів визначення релевантності, достовірності, цінності інформації, яка поширюється в СІС, створюють умови для маніпулювання суспільною свідомістю, зокрема, шляхом поширення недостовірної, неповної або упередженої інформації [6–8]. Результатом таких впливів є виникнення хаотично керованих вихідних дій акторів, а у випадку їх взаємодії і виконанні деяких визначених умов – поява синергетичних ефектів. Такі ефекти призводять до утворення у високоорганізованих системах управління різного ієрархічного рівня нових і нехарактерних їм властивостей, які називають емерджентними [9]. Своєчасне встановлення сутності і змісту синергетичних ефектів у СІС, їх завчасне виявлення, прогнозування та оперативне попередження, є актуальною проблемою забезпечення інформаційної безпеки людини, суспільства та держави.

Метою статті є підвищення стійкості віртуальних спільнот СІС до деструктивних інформаційних впливів за рахунок підтримання бажаного рівня попиту акторів на контент, що становить інтерес. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі частинні задачі:

– обґрунтування і вибір параметра порядку, що визначає динаміку процесів взаємодії акторів у СІС;

– синтез синергетичного управління процесами взаємодії акторів у СІС;

– моделювання взаємодії акторів у СІС із врахуванням синергетичного управління.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Нехай у формалізованому вигляді взаємодія акторів у деякому СІС описується системою нелінійних диференціальних рівнянь вигляду [10]

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = -cy + xy. \end{cases} \quad (1)$$

Поставимо задачу управління нелінійною системою (1) з метою підтримання заданого рівня попиту акторів $x(t)$ досліджуваної віртуальної спільноти на відповідний контент, впливаючи на швидкість поширення цього контенту та контенту, аналогічного за сутністю і змістом. Синтезоване управління повинне спростити процес штучно-керованого підтримання заданого рівня попиту акторів за рахунок виникнення у системі процесів самоорганізації. Визначений рівень зацікавленості акторів у контенті СІС має бути гарантованим і досягнутим за деякий проміжок часу T .

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що СІС належать до класу нелінійних динамічних систем [4, 9, 11–13]. Поведінка таких систем характеризується непередбачуваністю і некерованістю, тому для дослідження управління процесами взаємодії акторів в СІС доречно скористатися положеннями динамічної теорії хаосу. Встановлено, що одним із найбільш перспективних методів досягнення заданої поведінки акторів у системі є такі, що використовують їх здатність до самоорганізації, однією з необхідних умов виникнення якої є підтримання стану нерівноваги [10, 14, 15]. Завдяки процесам самоорганізації – теоретичній основі синергетики, можна виділити відносно невелику кількість параметрів порядку чи характеристик середовища, які визначають динаміку системи в цілому. Таким чином, наявність хаотичного атратора забезпечує досягнення стійкого стану системи за незначних збурень системних параметрів.

В основу досліджень було покладено концепцію синергетичного управління процесами взаємодії акторів у СІС [9, 14]. Вирішення проблеми управління рівнем попиту акторів СІС на контент шляхом синтезу синергетичного управління, яке забезпечить виникнення процесів керованої самоорганізації акторів у СІС для досягнення заданого стану інформаційної безпеки віртуального співтовариства є актуальною.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Синтезуємо синергетичне управління пропозицією контенту у СІС, для якого система нелінійних диференціальних рівнянь (1) перетвориться до вигляду

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = -cy + xy + u(x, y). \end{cases} \quad (2)$$

Для забезпечення переходу віртуальної спільноти акторів СІС до бажаного стану і появи заданих синергетичних ефектів синтезуємо закон управління $u(x, y)$ на основі заданого параметра порядку $\psi_v(x, y) = 0$. Введемо в структуру системи динамічні інваріанти – атратори, які враховують природні особливості взаємодії акторів СІС [1, 6]. Тоді макрозмінна $\psi_v(x, y)$ набуває вигляду [9, 14]

$$\psi_v(x, y) = y - \varepsilon_1 x - \varepsilon_2 x^2. \quad (3)$$

Завдяки синергетичному управлінню $u(x, y)$ для підтримання заданого рівня попиту акторів СІС на контент в системі нелінійних диференціальних рівнянь (2) будуть запущені перехідні процеси. Для забезпечення перебігу таких процесів за деякий час T_v , обрана макрозмінна (3) повинна задовольняти умову

$$T_v \frac{d\psi_v(t)}{dt} + \psi_v(t) = 0. \quad (4)$$

Після підстановки макрозмінної (3) в рівняння (4), враховуючи початкову систему диференціальних рівнянь (1), отримаємо синергетичне управління

$$u(x, y) = cy - xy + (ax - xy - bx^2)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 x) - \frac{1}{T_v}(y - \varepsilon_1 x - \varepsilon_2 x^2). \quad (5)$$

Отже, синтезована система нелінійних диференціальних рівнянь (2), яка забезпечує заданий рівень попиту акторів СІС на контент із врахуванням управління (5) набуває вигляду

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = (ax - xy - bx^2)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 x) - \frac{1}{T} \psi(t). \end{cases} \quad (6)$$

Зображуюча точка синтезованої нелінійної системи (6) рухається здовж стабілізуючого інваріанта (3) відповідно до диференціального рівняння

$$\frac{dx_\psi}{dt} = x_\psi (a - x_\psi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi). \quad (7)$$

Диференціальне рівняння (7) є рівнянням логістичного типу, що підтверджує вимогу врахування при виборі атратора $\psi_v(t)$ особливостей поведінки акторів у СІС, а саме зміну в часі цінності контенту, що становить інтерес, і, як наслідок, зменшення попиту на нього $x(t)$.

Дослідимо на стійкість диференціальне рівняння (7), використовуючи функцію Ляпунова $V = 0,5x_\psi^2$ [16]. Для цього запишемо похідну від функції V із врахуванням диференціального рівняння (7)

$$V' = \frac{dV}{dt} \Big|_{x_\psi = x_\psi (a - x_\psi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi)} = x_\psi^2 (a - x_\psi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi) < 0. \quad (8)$$

Із нерівності (8) визначимо умови асимптотичної стійкості синтезованої системи диференціальних рівнянь (6). Для попиту акторів СІС на контент $x_\psi(t) > 0$ похідна від функції Ляпунова $V' < 0$, якщо

$$a > 0, b > 0, \varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi > b. \quad (9)$$

Отже, при виконанні нерівностей (9) синтезована система нелінійних диференціальних рівнянь (6) володіє властивістю асимптотичної стійкості відносно стану $x = 0, y = 0$. Із диференціального рівняння (7), враховуючи умови (9) отримаємо значення точок сплеску синергетичного ефекту для попиту на контент акторів СІС x_v і пропозиції y_v , в яких система досягає бажаного стану на

фазовій площині

$$x_0 = -\frac{1}{2\varepsilon_2} \left(b + \varepsilon_1 - \sqrt{b^2 + 2b\varepsilon_1 + \varepsilon_1^2 + 4a\varepsilon_2} \right),$$

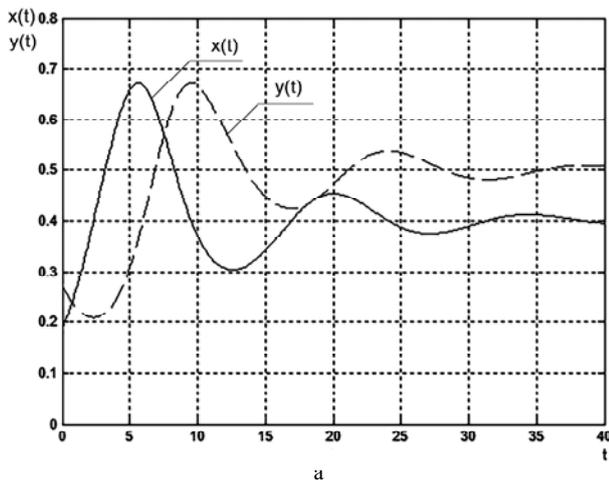
$$y_0 = \varepsilon_1 x_0 - \varepsilon_2 x_0^2. \quad (10)$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо дослідження зміни попиту на контент акторів СІС, використовуючи метод фазової площини якісної теорії диференціальних рівнянь засобами модуля PPLANE8 і пакету прикладних програм MatLab. Нехай параметри досліджуваної системи нелінійних диференціальних рівнянь (1) приймають значення $a = 0,7$, $b = 0,5$, $c = 0,4$, тоді графік зміни попиту і пропозиції контенту в СІС та фазовий портрет системи виглядають як показано на рис. 1.

На фазовому портреті (рис. 1а) видно, що система нелінійних диференціальних рівнянь (1) має стаціонарну точку типу фокус, в якій переходить до керованого стану за час $t = 40$ і попит акторів СІС на контент приймає значення $x = 0,4$, а пропозиція з надання контенту $y = 0,5$.

Проаналізуємо зміну попиту акторів СІС в результаті дії синтезованого синергетичного управління (5) для системи (1), що формалізує взаємодію акторів у деякому СІС. Нехай



параметри нелінійної системи диференціальних рівнянь (6) набувають значень $a = 0,7$, $b = 0,5$, $\varepsilon_1 = 1,5$, $\varepsilon_2 = 1,1$, $T = 1$. Результати моделювання наведено на рис. 2.

В результаті дії синтезованого управління система (6) керовано переходить до бажаного стану в точці сплеску синергетичного ефекту $x_0 = 0,3$ і $y_0 = 0,55$, яка є стаціонарною точкою типу фокус, а фазові траєкторії синтезованої системи організовано прямують до обраного параметра порядку $\psi_0(x, y) = 0$. Внаслідок синергетичного управління, що реалізоване як зворотній зв'язок, у точці сплеску синергетичного ефекту з координатами $(x_0; y_0)$ досягається зменшення попиту акторів СІС $x(t)$ на контент.

Регуляризацію попиту акторів СІС $x(t)$ на контент реалізовано варіюванням параметрів ε_1 і ε_2 синтезованої системи нелінійних диференціальних рівнянь (6). В табл. 1 наведено результати розрахунку значень фазових координат точки сплеску синергетичного ефекту $(x_0; y_0)$.

Графічне зображення поверхні залежності рівня попиту акторів СІС на контент $x(t)$ від параметрів регуляризації ε_1 і конкуренції на публікацію аналогічного контенту ε_2 подано на рис. 3.

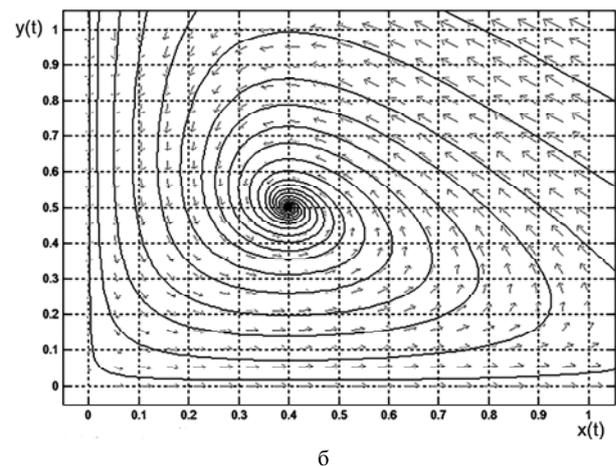


Рисунок 1 – Система у стані динамічного хаосу: а) графік зміни попиту і пропозиції контенту в СІС; б) фазовий портрет системи

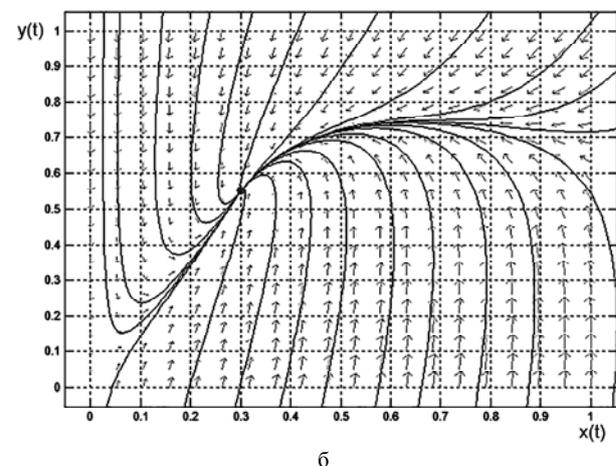
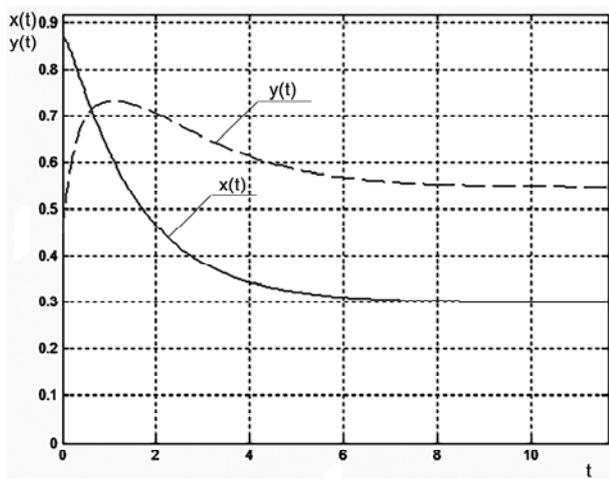


Рисунок 2 – Система у керованому стані: а) графік зміни попиту і пропозиції контенту в СІС для початкових значень $x_0 = 0,5$ і $y_0 = 0,85$; б) фазовий портрет системи

Таблиця 1 – Координати точки сплеску синергетичного ефекту

Коефіцієнт регуляризації попиту ε_1	Коефіцієнт регуляризації конкуренції на публікацію ε_2	Точка сплеску синергетичного ефекту (x_0, y_0)	
		x_0	y_0
0,5	$\varepsilon_2 = 1$	0,48	0,46
1		0,37	0,51
1,5		0,30	0,54
2		0,25	0,57
2,5		0,22	0,59
3		0,19	0,61
$\varepsilon_1 = 1$	0,5	0,41	0,50
	1	0,37	0,51
	1,5	0,35	0,53
	2	0,33	0,54
	2,5	0,31	0,55
	3	0,29	0,55

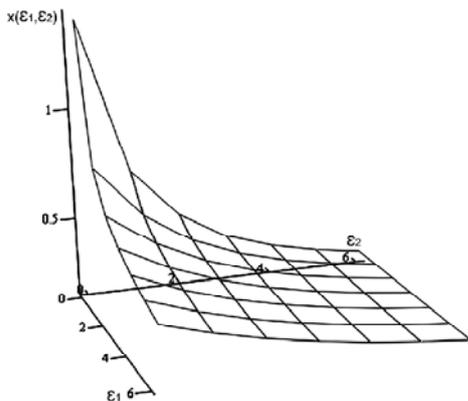


Рисунок 3 – Поверхня зміни бажаного рівня попиту акторів на контент

5 ОБГОВОРЕННЯ

Результатом впливу синтезованого синергетичного управління взаємодією акторів у СІС є поява процесів самоорганізації, під дією яких відбувається перехід від хаотичної динаміки до керованого стану. При цьому система із будь-якого стану переходить на атрактор $\psi(t) = 0$, по якому рухається до точки сплеску синергетичного ефекту взаємодії акторів, в якій досягається заданий рівень попиту на контент $x(t)$. На інваріантному різноманітті реалізується редукція ступенів свободи нелінійної динамічної системи, що спрощує процес підтримання заданого рівня попиту акторів шляхом варіювання параметрів регуляризації попиту ε_1 і конкуренції акторів СІС на публікацію аналогічного контенту ε_2 . В окремих випадках підтримання бажаного рівня попиту акторів на контент в СІС досягається в результаті зміни тільки одного із параметрів синергетичного управління ε_1 чи ε_2 , що спрощує та підвищує ефективність процесів управління взаємодією акторів у СІС, яка належить до класу складних систем.

ВИСНОВКИ

Розглянуто спосіб штучного підтримання в акторів СІС заданого рівня зацікавленості до контенту, що становить інтерес, який ґрунтується на виникненні синергетичного ефекту внаслідок запуску процесів самоорганізації акторів у СІС. Точка сплеску синергетичного ефекту є притягуючим атрактором системи, на якому реалізується редукція ступенів свободи вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь і забезпечується спрощення процесу досягнення поставлених

завдань взаємодії акторів у СІС. Ефективне управління взаємодією акторів здійснює синергетично керований перехід до заданого стану інформаційної безпеки віртуального співтовариства. Подальші дослідження будуть направлені на вироблення рекомендацій по реалізації синергетичного управління взаємодією акторів СІС для переходу віртуального співтовариства до бажаного стану інформаційної безпеки.

ПОДЯКИ

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних технологій і моделювання систем Житомирського національного агроєкологічного університету в рамках госпдоговірної науково-дослідницької теми «Методологія побудови сучасних інформаційних технологій аналізу і відображення стану інформаційної та екологічної безпеки держави» ДР№ 0115U004181 за сприяння науково-дослідного відділу інформаційної та кібернетичної безпеки наукового центру Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова в особі начальника відділу – д.т.н., с.н.с. Р. В. Грищука.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грищук Р. В. Стартуп віртуальних спільнот у соціальних мережах за принципом критичної маси / Р. В. Грищук // Захист інформації. – Луганськ : СНУ. – 2015. – Спеціальний випуск. – С. 19–25.
2. Грищук Р. В. Мобільні соціальні інтернет-сервіси як один із різновидів масової комунікації на сучасному етапі / Р. В. Грищук, Ю. Г. Даник, О. В. Самчишин // Безпека інформації : НАУ. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 16–20.
3. Даник Ю. Г. Сучасні мобільні соціальні інтернет сервіси як один з перспективних засобів масової комунікації / Ю. Г. Даник, Р. В. Грищук, О. В. Самчишин // Наук.-практ. конф. [«Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави»] (Київ, 19 берез. 2015 р.). – К. : Центр. навч., наук. та період. видань НА СБ України, 2015. – С. 232–235.
4. Epstein J. M. Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling / Joshua M. Epstein. – Princeton : Princeton University Press, 2012. – 384 p.
5. Tatnall A. Actor-Network Theory and Technology Innovation : Advancements and New Concepts. Information Science Reference / A. Tatnall. – New York, 2010. – 328 p.
6. Пелешишин А. М. Процеси управління інтерактивними соціальними комунікаціями в умовах розвитку інформаційного суспільства : монографія / А. М. Пелешишин, Ю. О. Серов, О. Л. Березко [та ін.] ; за ред. А. М. Пелешишина. – Л. : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 368 с.
7. Ліпкан В. А. Національна безпека України : навч. посіб. / В. А. Ліпкан. – К. : Кондор, 2008. – 552 с.
8. Губанов Д. А. Социальные сети : модели информационного влияния, управления и противоборства / Д. А. Губанов, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили ; под ред. Д. А. Чхартишвили. – М. : Изд. физ.-мат. лит., 2010. – 228 с.
9. Грищук Р. В. Концепція синергетичного управління процесами взаємодії агентів у соціальних інтернет-сервісах / Р. В. Грищук, К. В. Молодецька // Безпека інформації. – К. : НАУ. – 2015. – Т. 21. – Ч. II. – С. 123–130.
10. Сериков А. В. Эффективность хозяйственной деятельности : определение, измерение, синергетическое управление / А. В. Сериков // Економічний вісник Донбасу. – 2011. – № 2 (24). – С. 212–219.
11. Epstein Joshua M. Nonlinear Dynamics, Mathematical Biology, and Social Science : lecture notes / Joshua M. Epstein. – Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1997. – 164 p.
12. Сазанов В. М. Социальные сети : Анализ – Технологии – Перспективы. Обзор : [Електронний ресурс] / Сайт Лаборатории СВМ. – Режим доступу : http://ntl-cbm.narod.ru/SVM-NET/net_gew.doc (дата звернення: 17.08.15). – Назва з екрану.
13. Горбулін В. П. Інформаційні операції та безпека суспільства : загрози, протидія, моделювання : монографія / В. П. Горбулін, О. Г. Додонов, Д. В. Ланде. – К. : Інтертехнологія, 2009. – 164 с.
14. Колесников А. А. Синергетическое методы управления сложными системами : теория системного синтеза / А. А. Колесников. – М. : Едиторал УРСС, 2005. – 228 с.

15. Пригожин И. Порядок из хаоса : Новый диалог человека с природой [пер. с англ.] / И. Пригожин, И. Стенгерс ; под. общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. – М. : Наука, 1984. – 432 с.
16. Самойленко А. М. Дифференциальные уравнения в приложениях и задачах : навч. посіб. / А. М. Самойленко, С. А. Кривошея, М. О. Перестюк. – К. : Вища школа, 1994. – 455 с.

Стаття надійшла до редакції 04.09.2015.

Після доробки 10.09.2015.

Молодецкая К. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и моделирования систем Житомирского национального агроэкологического университета, Житомир, Украина

СПОСОБ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ СПРОСА АКТОРОВ СОЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСОВ НА КОНТЕНТ

Современные социальные интернет-сервисы являются новейшей виртуальной платформой, которая обеспечивает онлайн коммуникацию между участниками соответствующих виртуальных сообществ. Популярность социальных интернет-сервисов, кроме всех их положительных коммуникационных возможностей, порождает ряд потенциальных угроз информационной безопасности личности, общества, государства. В частности, особенно опасны угрозы, направляемых злоумышленниками на манипулирование общественным сознанием. При этом явления социальной коммуникации, возникающие вследствие взаимодействия акторов, характеризуются непредсказуемостью процессов. Это приводит к возникновению состояния неуправляемого хаоса, который имеет непосредственное отражение в оффлайне. С целью обеспечения управляемости такими процессами в статье предложено использовать концепцию синергетического управления взаимодействием акторов в социальных интернет-сервисах. Синтезируемое в результате синергетическое управление обеспечивает повышение устойчивости виртуальных сообществ к деструктивным воздействиям в разрезе управления спросом акторов на контент в социальных интернет-сервисах. На основе выбранного динамического инварианта показана возможность обеспечения протекания в виртуальных сообществах процессов управляемой самоорганизации акторов для перехода системы в управляемое подконтрольное состояние. Выбранный в статье аттрактор учитывает базовые особенности коммуникации акторов, такие как изменение во времени ценности контента и обеспечение достижения поставленной цели от взаимодействия акторов виртуального сообщества в точке всплеска синергетического эффекта. В результате воздействия синтезированного синергетического управления на инвариантном многообразии реализуется редукция степеней свободы нелинейной динамической системы – процесса взаимодействия. Как следствие, упрощается процесс искусственно управляемого поддержания заданного уровня спроса акторов и обеспечивается удачный старт новых брендов.

Ключевые слова: социальные интернет-сервисы, взаимодействие акторов, спрос на контент, динамический хаос, синергетическое управление, аттрактор, информационная безопасность.

Molodetska K.

Ph.D., Associate Professor of IT and Simulation Department at Zhytomyr National Agro-Ecological University, Zhytomyr, Ukraine

METHOD OF MAINTENANCE THE SPECIFIED LEVEL FOR SOCIAL NETWORKING SERVICES ACTORS' MARKET FOR THE CONTENT

Modern social networking services are a brand-new virtual platform to host online communication between participants of virtual communities. Social networking services having good communicational capabilities and thus enjoying popularity bear a number of potential threats to individual, social and national information security. The greatest are threats aimed to manipulate the social mind. Social communications resulting from the actors' interactions yet feature unpredictability of the processes. This creates an uncontrolled chaotic state that glasses itself offline. It is suggested in the paper to apply the concept of social network actors' interactions synergetic control to those processes. The synergetic control synthesized improves the social proof tolerance by controlling social networking services actors' market for attractive information. The dynamic invariant chosen shows the possible controlled self-organization process in a virtual community to drive the system transition to the controlled state. The attractor shown in the paper factors such basic features of the actors' communication as the content value time shift and the virtual community actors' interactions goal hit in a synergy splash point. Under synergetic control the degrees of freedom of a nonlinear dynamic system get reduced on the invariant manifold as a result of the interaction process. That simplifies the content market management and promotes new startups.

Keywords: social networking services, actors' interactions, content market, chaotic dynamics, synergetic control, attractor, information security.

REFERENCES

1. Hryshchuk R. V. Startap virtualnykh spilnot u sotsialnykh merezhakh za pryntsyom krytychnoi masy, *Zakhyst informatsii*. Luhansk, SNU, 2015, Spetsialnyi vypusk, pp. 19–25.
2. Hryshchuk R. V., Danyk Yu. H., Samchyshyn O. V. Mobilni sotsialni internet-servisy yak odyz iz riznovydiv masovoi komunikatsii na suchasnomu etapi, *Bezpeka informatsii*, 2015, vol. 21. No. 1, pp. 16–20.
3. Danyk Yu. H., Hryshchuk R. V., Samchyshyn O. V. Suchasni mobilni sotsialni internet servisy yak odyz z perspektyvnykh zasobiv masovoi komunikatsii, *Aktualni problemy upravlinnia informatsiinoiu bezpekoiu derzhavy, nauk.-prakt. konf.* 19 berez. 2015 r. Kiev, Tsentr. navch., nauk. ta period. vydan NA SB Ukrainy, 2015, pp. 232–235.
4. Joshua M. Epstein Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton, Princeton University Press, 2012, 384 p.
5. Tatnall, A. Actor-Network Theory and Technology Innovation : Advancements and New Concepts. Information Science Reference. New York, 2010, 328 p.
6. Peleshchychyn A. M., Sierov Yu. O., Berezko O. L. [ta in.] ; za red. A. M. Peleshchychyna Protsesy upravlinnia interaktyvnymy sotsialnymy komunikatsiay v umovakh rozvytku informatsiinoho suspilstva : monohrafiia. L'viv, Vydvo Lvivskoi politekhniki, 2012, 368 p.
7. Lipkan V. A. Natsionalna bezpeka Ukrainy : navch. posib. Kiev, Kondor, 2008, 552 p.
8. Gubanov D. A., Novikov D. A., Chhartishvili A. G.; pod red. D. A. Chhartishvili Social'nye seti : modeli informacionnogo vlianiia, upravleniia i protivoborstva. Moscow, Izd. fiz.-mat. lit., 2010, 228 p.
9. Hryshchuk R. V., Molodetska K. V. Kontsepsiia synerhetychnoho upravlinnia protsesamy vzaiemodii ahentiv u sotsialnykh internet-servisakh, *Bezpeka informatsii*, Kiev, NAU, 2015, vol. 21, Ch. II, pp. 123–130.
10. Serikov A. V. Jeftektivnost' hozhajstvennoj dejatel'nosti : opredelenie, izmerenie, synergeticheskoe upravlenie, *Ekonomichnij visnik Donbasu*, 2011, No. 2 (24), pp. 212–219.
11. Epstein Joshua M. Nonlinear Dynamics, Mathematical Biology, and Social Science : lecture notes. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1997, 164 p.
12. Sazanov V. M. Social'nye seti : Analiz-Tehnologii-Perspektivy. Obzor : [Elektronnij resurs] Sajt Laboratorii SVM. Rezhim dostupu : http://ntl-cbm.narod.ru/CBM-NET/net_rew.doc (data zvernennia: 17.08.15). Nazva z ekranu.
13. Horbulin V. P., Dodonov O. H., Lande D. V. Informatsiini operatsii ta bezpeka suspilstva : zahrozy, protydiia, modeliuvannia : monohrafiia. Kiev, Intertekhnolohiia, 2009, 164 p.
14. Kolesnikov A. A. Sinergeticheskoe metody upravleniia slozhnymi sistemami : teoriia sistemnogo sinteza. Moscow, Editorial URSS, 2005, 228 p.
15. Prigozhin I., Stengers I.; pod. obshh. red. V. I. Arshinova, Ju. L. Klimontovicha, Ju. V. Sachkova Porjadok iz haosa : Novyj dialog cheloveka s prirodoy [per. s angl.]. Moscow, Nauka, 1984, 432 p.
16. Samoilenko A. M., Kryvosheia S. A., Perestiuk M. O. Diferentsialni rivniannia u prykladakh i zadachakh : navch. posib. Kiev, Vyscha shkola, 1994, 455 p.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 4/2015

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук В. В. Погосов

Заст. головного редактора – д-р техн. наук С. О. Субботін

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 17.12.2015. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 13,72.
Тираж 300 прим. Зам. № 1244.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.