

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**
№ 2, 2015

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**
No 2, 2015



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Федор Иванович Пантелеенко

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботько, Р. Венерстен (Швеция),
В. А. Ганэ, Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, Э. Г. Лазаревич,
А. А. Лобаты, В. А. Мищенко, А. Патрин (Польша),
И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович,
А. Н. Чичко, В. Б. Байбури (Россия),
Е. И. Никифорович (Украина)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Phyodor Panteleenko

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, P. Venersten (Sweden),
V. Ganeh, N. Gurskiy, J. Zaharik, E. Lazarevich,
A. Lobaty, V. Mishchenko, A. Patrin (Poland),
I. Satikov, V. Starovoytov, P. Urbanovich,
A. Chichko, V. Bayburin (Russia),
E. Nikiforovich (Ukraine)

Содержание

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Сенник Ю. С., Гребенников И. Р.**
Жизненный цикл информационных систем 4
- Прыхожы А. А., Карасік А. М.**
Кааператыўныя блочна-паралельныя алгарытмы
рашэння задач на шмат'ядравых сістэмах 10
- Пей Пинг, Петренко Ю. Н.**
Моделирование ячеистых сетей 19

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

- Гурский Н. Н., Нажжарин М.**
Имитационная модель управления движением больше
грузной машины с электроприводом постоянного тока
..... 27
- Однолько Д. С.**
Математическое имитационное моделирование системы
бездатчикового векторного управления асинхронным
двигателем в условиях параметрических возмущений
..... 31
- Еромин А. М., Шабан С. А., Подкопаев П. А.**
Аналитическое конструирование контура телеуп-
равляемого беспилотного летательного аппарата по
критерию обобщенной работы 36
- Татур М. М.**
Концепция построения системы управления мо-
бильным роботом на платформе серийного мини-
трактора «Беларус 132» 43

SYSTEM ANALYSIS

- Sennik Y. S., Grebennikov I. R.**
Cycle of information systems 4
- Prihozhya A., Karasik O.**
Cooperative block-parallel algorithms for task execution
on multi-core system 10
- Pei Ping, Petrenko Y.**
Mesh network simulation 19

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

- Hurski N., Najjarin M.**
Simulation models of heavy trucks traffic control with
electric DC drive 27
- Odnolko D.**
Mathematical simulation of sensorless vector control
induction motor under parametric perturbations 31
- Eromin A., Shaban A., Podkopaev P.**
Analytical engineering of a telecontrolled pilotless
aircraft contour in accordance with generalized work
criterion 36
- Tatur M.**
Concept of management system platform mobile robot
based on serial tractor "Belarus 132" 43

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ****Лях Б.А., Кондратенюк В.А.**

Моделирование системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи коротковолнового диапазона 50

Федоров А.А., Новиков С.О.

Использование эвристических алгоритмов при построении оптимального дерева решений для управления бюджетом 54

Рудикова Л.В.

О разработке универсальной системы обработки данных, связанных с лазерной экспрессной экспертизой 58

Рыбак В.А.

Применение генетических алгоритмов для решения задач оптимизации качества окружающей среды. ... 65

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING****Liakh B., Kondratyionok V.,**

Modeling of radio monitoring system of short-wave radio communication adaptive systems 50

Fiodarau A., Novikov S.

Heuristic algorithms usage while construction of optimal decision tree for budget management 54

Rudikova L.

Unified data processing system development for an express laser examination 58

Ryback V.

Application of genetic algorithms for solving optimization problems of environmental quality. 65

Ответственный секретарь редакции

Лакин В. И.

Адрес редакцииул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь

Тел. +375 17 267-66-84

e-mail: CA_PI@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

V. Lakin

Editorial board address25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus

Tel. +375 17 267-66-84

e-mail: CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь.

Подписано в печать 11.09.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 100 экз. Заказ 690.

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛПН № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, Пр. Независимости, 65.

© Системный анализ и прикладная информатика, 2015

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 65.011.56

СЕННИК Ю. С., ГРЕБЕННИКОВ Р. И.

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Белорусский национальный технический университет

Работа является обобщением теоретических положений, связанных с жизненным циклом информационных систем. Дано определение понятия жизненного цикла, указаны элементы, которые должен включать каждый этап цикла. Описаны методологии деления жизненного цикла на основные стадии, в том числе методика Rational Unified Process. Приведено описание основополагающего стандарта в данной области. Особое внимание в работе было уделено рассмотрению основных моделей жизненного цикла, проведена их сравнительная характеристика. На основе рассмотренных теоретических положений сделан вывод, что предпочтительной моделью жизненного цикла для корпоративной сети является спиральная модель и использование международных стандартов жизненного цикла, что позволяет значительно сэкономить усилия, время и материальные ресурсы.

Введение

За последние десятилетия информационные технологии, и информационные системы оказали существенное влияние на деятельность организаций по всему миру. Появление персональных компьютеров, создание локальных сетей, технологии «клиент-сервер» и сети Интернет позволило организациям существенно нарастить возможности по контролю и качеству управленческих решений в организационных структурах, вывело планирование финансовой и экономической деятельности на более высокий качественный уровень. В связи с широкой компьютеризацией общества на современном этапе предъявляются высокие требования к аппаратной части компьютеров, программному обеспечению и информационным системам.

Создание и функционирование информационной системы – сложный и многоэтапный процесс, который требует четкой структуризации работ и определенной методологии внедрения. В связи с этим предлагается использование понятие жизненного цикла информационной системы, который представляет собой непрерывный процесс ее построения и развития технического задания вплоть до изъятия из эксплуатации. Каждый этап жизненного цикла включает в себя определенный состав, последовательность осуществляемых работ и их непосредственные результаты. Отдельный этап

характеризуется различными методами и средствами, используемыми для выполнения работ, а также различными ролями и ответственностью участников. Результатом такого детализированного описания этапов жизненного цикла служит четко спланированный и организованный процесс коллективной разработки информационной системы [1].

Цикл информационной системы

Полный жизненный цикл информационной системы включает в себя, как правило, стратегическое планирование, анализ, проектирование, реализацию, внедрение и эксплуатацию. При этом жизненный цикл, в свою очередь, может делиться на стадии. Данное деление является достаточно вариативным и часто произвольным. В данной работе в качестве примера рассмотрим вариант такого деления, предложенный одной из ведущих фирм на рынке программного обеспечения средств разработки информационных систем Rational Software под названием Rational Unified Process (RUP) [2].

Согласно методике RUP жизненный цикл информационной системы подразделяется на четыре стадии (рисунок 1).

Границы каждой стадии определены некоторыми моментами времени, в которые необходимо принимать определенные критические решения и, следовательно, достигать определенных ключевых целей.

Рабочие процессы

Стадии

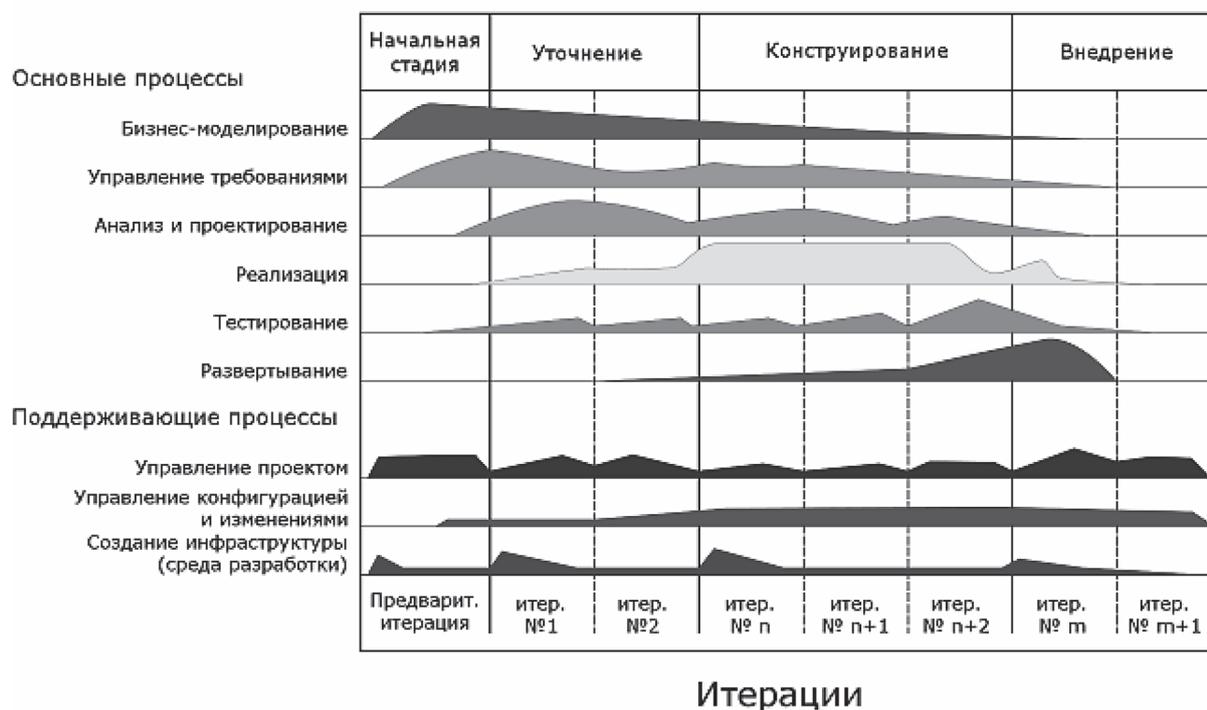


Рисунок 1. - Графическое представление процесса разработки по RUP

1. Начальная стадия. На начальной стадии устанавливается область применения системы и определяются граничные условия. Для этого необходимо идентифицировать все внешние объекты, с которыми должна взаимодействовать разрабатываемая система, и определить характер этого взаимодействия на высоком уровне. На начальной стадии идентифицируются все функциональные возможности системы и производится описание наиболее существенных из них.

2. Стадия уточнения. На стадии уточнения проводится анализ прикладной области, разрабатывается архитектурная основа информационной системы.

При принятии любых решений, касающихся архитектуры системы, необходимо принимать во внимание разрабатываемую систему в целом. Это означает, что необходимо описать большинство функциональных возможностей системы и учесть взаимосвязи между отдельными ее составляющими. В конце стадии уточнения проводится анализ архитектурных решений и способов устранения главных факторов риска в проекте.

3. Стадия конструирования. На стадии конструирования разрабатывается законченное из-

делие, готовое к передаче пользователю. По окончании этой стадии определяется работоспособность разработанного программного обеспечения.

4. Стадия передачи в эксплуатацию. На стадии передачи в эксплуатацию разработанное программное обеспечение передается пользователям. При эксплуатации разработанной системы в реальных условиях часто возникают различного рода проблемы, которые требуют дополнительных работ по внесению корректив в разработанный продукт. Это, как правило, связано с обнаружением ошибок и недоработок [3].

В конце стадии передачи в эксплуатацию необходимо определить, достигнуты цели разработки или нет.

Помимо методики RUP, существуют также и иные методологии деления жизненного цикла на фазы. Например, методика Microsoft Solution Framework (MSF) сходна с RUP, так как включает также четыре фазы: анализ, проектирование, разработка, стабилизация. Она является итерационной и предполагает использование объектно-ориентированного моделирования. MSF в сравнении с RUP в большей степени ориентирована на разработку бизнес-приложений.

Также существует и методика Extreme Programming (XP). Экстремальное программирование (самая новая среди рассматриваемых методологий) сформировалось в 1996 году. В основе методологии лежат командная работа, эффективная коммуникация между заказчиком и исполнителем в течение всего проекта по разработке ИС. При этом разработка ведется с использованием последовательно дорабатываемых прототипов.

Испытания информационных систем

Проектирование и испытания информационных систем регламентированы рядом стандартов, определяющим из которых является международный стандарт ISO/IEC 12207. В данном стандарте описывается структура жизненного цикла информационной системы, а также процессы, которые должны быть выполнены во время ее создания.

Данные процессы подразделяются на три группы:

- основные (приобретение, поставка, разработка, эксплуатация и сопровождение);
- вспомогательные (документирование, управление конфигурацией, обеспечение качества, аттестация, оценка, аудит и решение проблем);
- организационные (управление проектами, создание инфраструктуры проекта, определение, оценка и улучшение самого жизненного цикла, обучение) [4].

Однако стандарт ISO/IEC 12207 не предлагает конкретной модели жизненного цикла и методов разработки, его рекомендации являются общими для любых моделей жизненного цикла. Под моделью обычно понимается структура, определяющая последовательность выполнения и взаимосвязи процессов, действий

и задач на протяжении жизненного цикла. Поэтому в данной работе целесообразно рассмотреть некоторые из существующих моделей.

На современном этапе наиболее распространенными моделями жизненного цикла информационных систем (далее – ЖЦ ИС) являются следующие [5]:

- каскадная;
- спиральная;
- инкрементная.

Каскадная модель ЖЦ ИС или «модель водопада» (англ. waterfall model), предложенная в 1970 году Уинстоном Ройсом, предполагает последовательное выполнение всех этапов проекта в строго фиксированном порядке. Переход к следующему этапу происходит только после полного выполнения всех работ предыдущего этапа. Все требования и основные положения фиксируются в техническом задании и являются неизменными на протяжении всего времени разработки проекта. Завершение каждой стадии сопровождается выпуском полного комплекта документации для того, чтобы разработка информационной система могла быть продолжена на последующих этапах [6]. В общем виде данная модель представлена на рисунке 2.

Спиральная модель, автором которой является Барри Бозом, была разработана в 1988 году. Она основана на классическом цикле Деминга PDCA (plan-do-check-act). При использовании этой модели информационная система создается в несколько итераций наподобие витков спирали [6]. На каждом витке спирали осуществляется непосредственное создание очередной части информационной системы, уточняются существующие или формируются новые требования проекта, определяется качество проделанной работы и формируется план

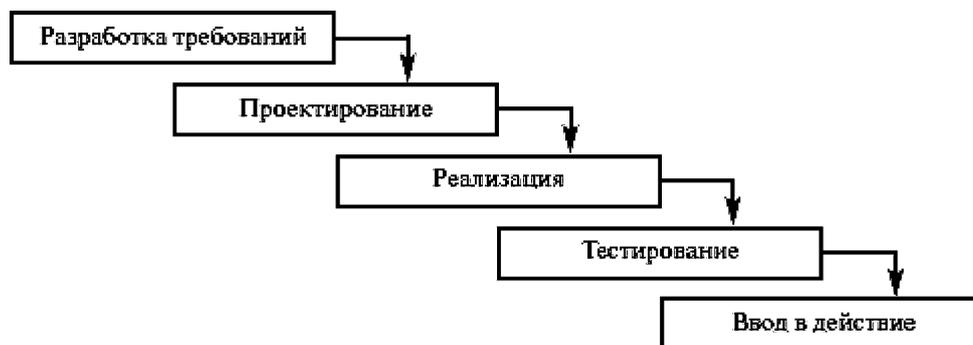


Рисунок 2. - Графическая интерпретация каскадной модели ЖЦ ИС



Рисунок 3. - Графическая интерпретация спиральной модели ЖЦ ИС

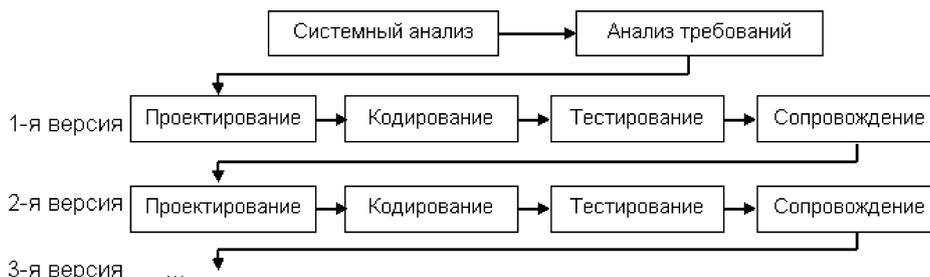


Рисунок 4. - Графическая интерпретация инкрементной модели ЖЦ ИС

работы на следующем витке спирали [7]. При этом на каждой итерации оцениваются:

- вероятность превышения сроков и бюджета проекта
- необходимость выполнения еще одной итерации
- степень полноты и точности понимания требований к системе
- целесообразность прекращения проекта.

Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 3.

В инкрементной модели ЖЦ ИС (англ. increment – увеличение, приращение) разработка информационной системы осуществляется с линейной последовательностью стадий, но в несколько инкрементов (версий), т. е. с запланированным улучшением продукта.

В начале работы над проектом определяются все основные требования к системе, после чего выполняется ее разработка в виде последовательности версий. При этом каждая версия является законченным и работоспособным продуктом. Первая версия реализует часть запланированных возможностей, следующая версия реализует дополнительные возможности и т. д., пока не будет получена полная система [8]. Графически данная модель показана на рисунке 4.

В [8] приведена сравнительная характеристика моделей, описанных выше (таблица).

Заключение

Модели жизненного цикла информационных систем предназначены для использования, прежде всего, создателями, разработчиками таких систем. Поэтому при использовании той или иной модели важно понять, в какой мере она может быть полезна для тех, кто реально занят эксплуатацией информационных систем.

Рассмотрев модели жизненного цикла, можно сделать вывод, что предпочтительной моделью жизненного цикла для корпоративной сети является спиральная модель. Это можно объяснить тем, что специалисты, занятые эксплуатацией сети, постоянно разрабатывают новую версию своей сети, проходя в такой работе на каждом витке спирали стандартные этапы и не дожидаясь, когда эффективность системы опустится ниже заданного порога или система не сможет удовлетворять постоянно растущим требованиям предприятия. Применение же при этом непрерывной информационной поддержки жизненного цикла продукта оказывается особенно полезным для сетей средних и крупных корпораций как эффективного и автоматизированного средства реализации выбранной модели жизненного цикла.

Использование международных стандартов жизненного цикла в этой работе позволяет значительно сэкономить усилия, время и мате-

Сравнение моделей ЖЦ ИС

Характеристика проекта	Модель		
	Каскадная	Инкрементная	Спиральная
Новизна разработки и обеспеченность ресурсами	Типовой. Хорошо проработаны технология и методы решения задачи Ресурсов заказчика и разработчика хватает для реализации проекта в сжатые сроки	Ресурсов заказчика или разработчика не хватает для реализации проекта в сжатые сроки	Нетиповой (новаторский). Нетрадиционный для разработчика
Масштаб проекта	Малые и средние проекты	Средние и крупные проекты	Любые проекты
Сроки выполнения проекта	До года	До нескольких лет. Разработка одной версии может занимать срок от нескольких недель до года	
Заключение отдельных договоров на отдельные версии	Заключается один договор. Версия и есть итоговый результат проекта	На отдельную версию или несколько последовательных версий обычно заключается отдельный договор	
Определение основных требований в начале проекта	Да	Да	Нет
Изменение требований по мере развития проекта	Нет	Незначительное	Да
Разработка итерациями	Нет	Да	Да
Распространение промежуточного ПО	Нет	Может быть	Да

риальные ресурсы. И в этом – главное достоинство использования таких моделей жизненного цикла, апробированных многократно и повсеместно.

Если говорить непосредственно об информационных системах, то можно сделать следующий вывод. Стремительный рост развития информационных систем затрагивает все сферы общественной жизни, а в частности, систему высшего профессионального образования и расширяет его возможности. Так, если говорить о дистанционном образовании, то информационная система является его важным элементом, так как данный процесс можно осуществить непосредственно с использованием информационных систем и технологий.

Информационные системы реализуют главную задачу дистанционного образования –

осуществлять образовательный процесс, не имея при этом прямого контакта со студентом. Информационные системы делают такой вид обучения доступным и удобным, помогают воспринимать учебную информацию с максимальной степенью восприятия и с высокой отдачей. Также следует отметить, что постоянное совершенствование информационных систем служит хорошим стимулом для развития новых методов и технологий в системе дистанционного образования. А внедрение новых информационных систем повышает качество данного обучения и его эффективность.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что значимость информационных систем для системы образования и общества в целом влечет за собой дальнейшую проработку данного вопроса и углубленное его изучение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грекул, В. И. Проектирование информационных систем / В. И. Грекул, Г. Н. Денищенко, Н. Л. Коровкина. – М.: Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ. ру, 2005.
2. Избачков С. Ю. Информационные системы / С. Ю. Избачков, В. Н. Петров. – СПб.: Питер, 2008. – 655 с.
3. Philippe Kruchten, Rational Unified Process— An Introduction, Addison-Wesley, 1999. – 311 p.
4. ISO/IEC 12207:2008 «System and software engineering – Software life cycle processes».
5. Петров, В. И. Информационные системы / В. Н. Петров. – СПб.: Питер, 2002. – 688с.
6. Братищенко, В. В. Проектирование информационных систем / В. В. Братищенко. – Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2004. – 84 с.
7. Орлов, С. А. Технологии разработки программного обеспечения: учеб. / С. А. Орлов. – СПб.: Питер, 2002. – 464 с.
8. Анисимов, В. В. Проектирование информационных систем / В. В. Анисимов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 112 с.

Поступила 12.05.15

Sennik Y., Grebennikov R.

LIFE CYCLE OF INFORMATION SYSTEMS

This work is a generalization of the theoretical propositions related to the life cycle of information systems. There was given the definition of the life cycle, specify which items you should include every step of the cycle. Describes the methodology division of the life cycle on the main stage, including methodology Rational Unified Process. The description of the fundamental standards in this area. Special attention was paid to the work of the basic life cycle models. It was carried out their comparative characteristics. On the basis of the theoretical propositions, it was concluded that the preferred model of the life cycle for the corporate network is a spiral model and the use of international standards in the life cycle saves a lot of effort, time and material resources.

УДК 681.3

ПРЫХОЖЫ А. А., КАРАСІК А. М.

КААПЕРАТЫЎНЫЯ БЛОЧНА-ПАРАЛЕЛЬНЫЯ АЛГАРЫТМЫ РАШЭННЯ ЗАДАЧ НА ШМАТ'ЯДРАВЫХ СІСТЭМАХ

Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт

Разглядаецца праблема балансавання вылічальнай нагрузкі на ядрах шмат'ядравай сістэмы і павышэння эфектыўнасці ўзаемадзеяння патокаў у шматпачочных праграмных прыкладанняў. Прапанаваны кааператыўныя блочна-паралельныя алгарытмы рашэння складаных задач, якія паддаюцца падзелу на часткі. Яны памяншаюць колькасць перадач кіравання паміж патокамі, скарачаюць даўжыню крытычнага шляху ў паралельнай рэалізацыі, павышаюць загрузанасць ядраў.

Увядзенне

Праблема распрацоўкі эфектыўных шматпачочных праграмных прыкладанняў для шмат'ядравых сістэм з'яўляецца навукова актуальнай і практычна запатрабаванай у навукова-тэхнічных галінах. Паралельнае шматпачочнае праграмаванне выконваецца для вырашэння многіх задач, якія маштабуюцца, напрыклад, задачы рашэння сістэмы лінейных алгебраічных раўнанняў (СЛАР) [1]. Праграмаванне і выкарыстанне шмат'ядравых сістэм падтрымліваецца аперацыйнымі сістэмамі з выцясненчай і кааператыўнай шматзадачнасцю. У працы [2] даследаваны метады рэалізацыі шматпачочных прыкладанняў на шмат'ядравых сістэмах, якія кіруюцца аперацыйнай сістэмай з выцясненчай шматзадачнасцю. У працы [3] паказана, што выкарыстанне кааператыўнай шматзадачнасці з'яўляецца пераважнай у параўнанні з выцясненчай шматзадачнасцю і што кааператыўная мадэль выканання патокаў дазваляе атрымаць значнае паскарэнне на шмат'ядравай сістэме. У дадзеным артыкуле прапануюцца кааператыўныя блочна-паралельныя алгарытмы рашэння задач, якія паддаюцца падзелу на часткі, і праводзіцца эксперыментальнае супастаўленне прапанаваных і вядомых алгарытмаў па шырокаму спектру параметраў і залежнасцяў.

Блочна-паралельныя алгарытмы Гаўса рашэння СЛАР

Метад Гаўса вырашае СЛАР выгляду $A \times x = b$, дзе A – лічбавая матрыца памерам

$M \times M$; x – вектар зменных памерам M ; b – лічбавы вектар памерам M . Прамы ход прыводзіць матрыцу A да трохкутнаму выглядзе. Зваротны ход знаходзіць значэння зменных x . Блочна-паралельныя алгарытмы Гаўса [1] арыентаваны на паралельную рэалізацыю на шматпрацэсарных сістэмах (мал. 1). Яны разбіваюць матрыцу A на блокі A^t , $t = 0, \dots, T - 1$ памерам $N \times M$ кожны, дзе $N = M / T$, і разбіваюць вектары x і b на блокі x^t і b^t адпаведна памерам N . Алгарытм $\mu 1$ ўключае ў паток t , які прымае значэнні ад 0 да $T - 1$, радкі $r = 0 + t \times N, 1 + t \times N \dots N - 1 + t \times N$ такім чынам, што ў паток 0 ўваходзяць радкі 0, ..., $N - 1$, ў паток 1 ўваходзяць радкі $N, \dots, 2N - 1$ і г. д. У якасці актыўнага радка алгарытм $\mu 1$ спачатку паслядоўна выбірае радкі патоку 0, затым радкі патоку 1 і г. д. да патоку $T - 1$ (мал. 1 злева). Алгарытм $\mu 2$ ўключае ў паток t радкі $r = t, T + t, \dots, (N - 1) \times T + t$ такім чынам, што ў паток 0 ўваходзяць радкі 0, $T, \dots, (N - 1) \times T$, у паток 1 ўваходзяць радкі 1, $T + 1, \dots, (N - 1) \times T + 1$ і г. д. У якасці актыўнага радка алгарытм $\mu 2$ спачатку паслядоўна выбірае нулявыя радкі патокаў 0, ..., $T - 1$, затым першыя радкі патокаў 0, ..., $T - 1$, і г. д. да радкоў з нумарамі $N - 1$ (мал. 1 справа).

На мал. 1 аперацыя $K(t, k)$ пералічвае актыўны радок $v = t \times N + k$ матрыцы A ў патоку t па першым ненулявым элеменце з нумарам v ў радку v : $a_{vj} = a_{vj}/a_{vv}$ і $b_v = b_v/a_{vv}$ для $j = v, \dots, M - 1$. Аперацыя $P(MyT, t, k, i)$ пералічвае пасіўны радок $v = MyT \times N + i$ матрыцы A ў пато-

```

for(p = 0; t < T; t++) {
  for(k = 0; k < N; k++) {
    if(myT==t) {
      K(t,k);
      for(d=t+1; d<T; d++) SEND(t,k,d);
      for(i=k+1; i<N; i++) П(t,t,k,i);
    } else if(myT>t) {
      RECEIVE(myT,k,t);
      for(i=0; i<N; i++) П(myT,t,k,i);
    }
  }
}
    
```

μ1

```

for(k = 0; k < N; k++) {
  for(p = 0; t < T; t++) {
    if(myT == t) {
      K(t,k); SEND(t,k,all);
      for(i=k+1; i<N; i++) П(t,t,k,i);
    } else if(myT<t) {
      RECEIVE(myT,k,t);
      for(i=k+1; i<N; i++) П(myT,t,k,i);
    } else if(myT>t) {
      RECEIVE(myT,k,t);
      for(i=k; i<N; i++) П(myT,t,k,i);
    }
  }
}
    
```

μ2

Малюнок 1. - Блочна-паралельныя алгарытмы μ1 і μ2 для аднаго патоку MyT (прамы ход)

№	ЛП 0			ЛП 1		
1	T0	K0	C0			
2	T0	Π0	C1	T1	Π0	C2
3	T2	Π0	C4	T1	Π0	C3
4	T2	Π0	C5	T3	Π0	C6
5	T0	K1	C1	T3	Π0	C7
6	T2	Π1	C4	T1	Π1	C2
7	T2	Π1	C5	T1	Π1	C3
8				T3	Π1	C6
9				T3	Π1	C7
10				T1	K2	C2
11	T2	Π2	C4	T1	Π2	C3
12	T2	Π2	C5	T3	Π2	C6
13				T3	Π2	C7
14				T1	K3	C3
15	T2	Π3	C4	T3	Π3	C6
16	T2	Π3	C5	T3	Π3	C7
17	T2	K4	C4			
18	T2	Π4	C5	T3	Π4	C6
19	T2	K5	C5	T3	Π4	C7
20				T3	Π5	C6
21				T3	Π5	C7
22				T3	K6	C6
23				T3	Π6	C7
24				T3	K7	C7

μ1

№	ЛП 0			ЛП 1		
1	T0	K0	C0			
2	T0	Π0	C4	T1	Π0	C1
3	T2	Π0	C2	T1	Π0	C5
4	T2	Π0	C6	T3	Π0	C3
5				T3	Π0	C7
6				T1	K1	C1
7	T0	Π1	C4	T1	Π1	C5
8	T2	Π1	C2	T3	Π1	C3
9	T2	Π1	C6	T3	Π1	C7
10	T2	K2	C2			
11	T2	Π2	C6	T1	Π2	C5
12	T0	Π2	C4	T3	Π2	C3
13				T3	Π2	C7
14				T3	K3	C3
15	T0	Π3	C4	T3	Π3	C7
16	T2	Π3	C6	T1	Π3	C5
17	T0	K4	C4			
18	T2	Π4	C6	T1	Π4	C5
19				T3	Π4	C7
20				T1	K5	C5
21	T2	Π5	C6	T3	Π5	C7
22	T2	K6	C6			
23				T3	Π6	C7
24				T3	K7	C7

μ2

Малюнок 2. - Крокі працы алгарытмаў μ1 і μ2 на 8 радках, 4 патоках, 2 працэсарах (прамы ход)

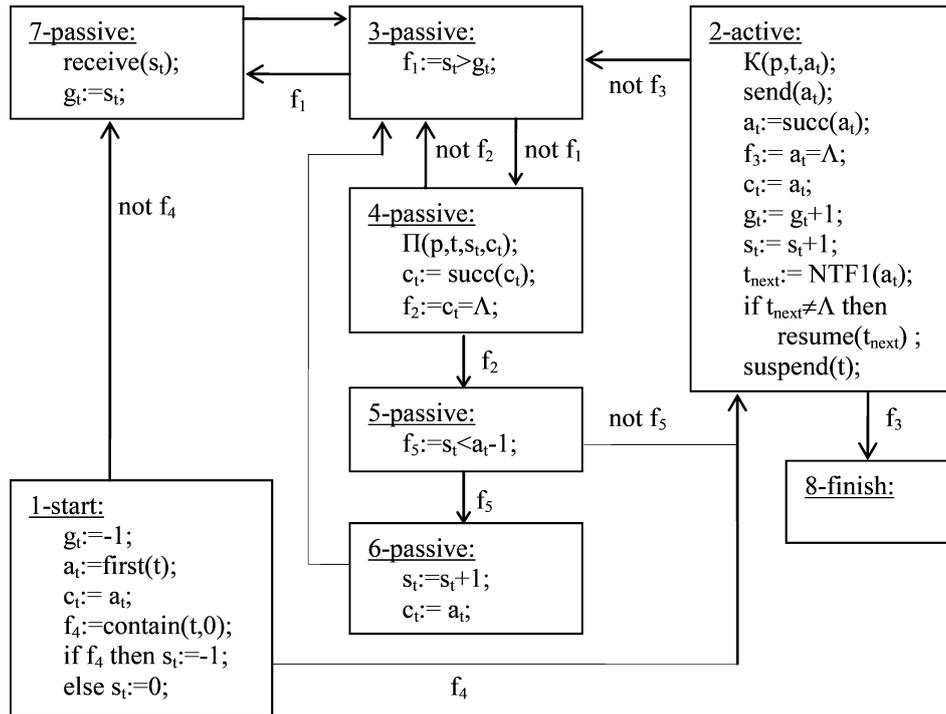
ку t па актыўнаму радку $u = t \times N + k$: $a_{vj} = a_{vj} - a_{vu} \times a_{uj}$ і $b_v = b_v - a_{vu} \times b_u$ для $j = u, \dots, M - 1$. Працаёмкасць аперацый $K(t, k)$ і $\Pi(MyT, t, k, i)$ лінейна меншае з павелічэннем нумары актыўнага патоку t і нумары актыўнага радка k , які належыць патоку t . Як паказана ў працы [2], вылічальная нагрузка нераўнамерная па патоках, прычым алгарытм μ1 дае больш нераўнамернае размеркаванне ў параўнанні з алгарытмам μ2.

Пры выкананні, патокі прызначаюцца на P працэсараў, прычым адзін працэсар рэалізуе T/P патокаў. Для алгарытмаў μ1 і μ2 мы выкарыстоўваем адно і тое ж прызначэнне: на працэсар $p \in \{0, \dots, P - 1\}$ прызначаюцца патокі з нумарамі $p, p + P, p + 2P, \dots, (K - 1) \times P + p$, дзе $K = T/P$. Такое прызначэнне згладжвае нераўнамернае

размеркаванне вылічальнай нагрузкі па патоках. Мал. 2 ілюструе крокі працы алгарытмаў μ1 і μ2 пры вырашэнні СЛАР з 8 радкоў, прызначаных на 4 патокі, якія выконваюцца на 2 працэсарах. Тут T_i – бягучы паток; K_j і Π_j – аперацыі, якія выконваюцца і выкарыстоўваюць радок j ; C_k – радок, над якім выконваюцца аперацыі.

Кааператыўны блочна-паралельны алгарытм μ1к

Асноўным прынцыпам пабудовы кааператыўнага алгарытму [1] з’яўляецца мінімізацыя колькасці перадач кіравання паміж патокамі на адным працэсары. Пры прызначэнні на адзін працэсар K патокаў, мінімальная колькасць перадач кіравання роўная $K - 1$. Гэты прынцып



Малюнак 3. - Кааператыўны блочна-паралельны алгарытм рашэння СЛАР (прамы ход)

добра спалучаецца з размеркаваннем радкоў па патоках у алгарытме $\mu 1$, дзякуючы якому паток t пасылае паведамленні патокам $h > t$ і ня пасылае паведамленні патокам $h < t$. Кааператыўны алгарытм будзеца такім чынам, што кожны з патокаў цалкам выконвае сваю працу, а затым перадае кіраванне наступнаму патоку з большым нумарам, прызначанаму на той жа працэсар. Неабходнай умовай выканання работы патокам з'яўляецца назапашванне ўсіх радкоў ад іншых патокаў, якія папярэднічаюць радкам дадзенага патоку. Патоки на адным працэсары выконваюцца паслядоўна, на розных працэсарах – паралельна.

Дыяграма высокаўзроўневага аўтамата, якая апісвае паводзіны аднаго актыўнага патоку t , што функцыянуе згодна з алгарытмам $\mu 1$, выконваецца на працэсары p і ўзаемадзейнічае з іншымі патокамі, паказаная на мал. 3. Дыяграма ўключае 8 станаў, якія функцыянуюць у 4 рэжымах: *start*, *active*, *passive* і *finish*. Стан 1-*start* ініцыялізуе паток t . Стан 2-*active* выконвае аперацыі над актыўным радком a_t . Станы 3-*passive* ... 7-*passive* выконваюць аперацыі над пасіўным радком c_t , каэфіцыенты якога пералічваюцца па радку s_t . Стан 8-*finish* з'яўляецца канчатковым ў патоку t .

У пачатковым стане 1-*start* зменнай g_t , якая прадстаўляе на бягучы момант часу глабальна

актыўны радок, прысвойваецца пустое значэнне -1 . Далей, у наступных выпадках, радок g_t генеруецца патокам t на працэсары p з дапамогай аперацыі $K(p, t, k)$ або прымаецца ад іншага патоку, які выконваецца на працэсары p або на іншых працэсарах. Зменнай a_t , ($a_t > g_t$), якая вызначае радок, што павінен стаць наступным актыўным радком ў патоку t , прысвойваецца найменшы ў патоку t радок $first(t)$. Заўважым, што радку a_t можа спатрэбіцца пэўны час каб стаць актыўным, паколькі яму можа спатрэбіцца пералік ад іншых папярэдніх радкоў з іншых патокаў, якія стануць актыўнымі да таго як актыўным стане радок a_t . Першым пасіўным радком c_t патоку t з'яўляецца пачатковы радок $first(t)$. Калі паток t ўтрымлівае радок з нулявым нумарам (у гэтым выпадку выконваецца прэдыкат $contain(t, 0)$), зменнай f_4 прысвойваецца значэнне *true*, а зменнай s_t прысвойваецца пустое значэнне -1 , пасля чаго выконваецца пераход аўтамата ў стан 2-*active*. У адваротным выпадку зменнай f_4 прысвойваецца значэнне *false*, зменнай s_t прысвойваецца значэнне 0 , а аўтамат пераходзіць у стан 7-*passive*.

У стане 2-*active* радок a_t нармалізуецца аперацыяй $K(p, t, a_t)$ і пасылаецца іншым патокам з мэтай пераліку прызначаных на іх радкоў. У якасці новага a_t выбіраецца наступны

```

function NextThreadF(Th, Pr) {
  for each  $p \in P$  {  $\pi_p := -1$ ; }
  for  $i := 1, \dots, M$  {
     $t := Th_i$ ;  $p := Pr_i$ ;
    if  $\pi_p = -1$  then {  $\pi_p := i$ ; } else {  $NTF(\pi_p) := t$ ;  $\pi_p := i$ ; }
  }
  for each  $p \in P$  {  $NTF(\pi_p) := -1$ ; }
  return  $NTF$ ;
}

```

Малюнак 4. - Функцыя вылічэння вектара NTF патокаў, якім перадаецца кіраванне пасля выканання аперацыі $K(p, t, a_i)$

радок, уключаны ў t , які становіцца таксама пасіўна пералічваемым радком c_i . Нумары глабальна актыўнага радка g_i і радка s_i павялічваецца на 1, а наступным актыўным патокам t_{next} на працэсары p становіцца паток $NTF1(a_i)$. Аператар $resume(t_{\text{next}})$ аднаўляе паток t_{next} калі гэта непусты паток, а аператар $suspend(t)$ прыпыняе паток t . Калі радок a_i з'яўляецца пустым Λ , то зменнай $f3$ прысвойваецца значэнне $true$, а аўтамат пераходзіць у канчатковы стан 8-finish , у адваротным выпадку аўтамат пераходзіць у стан 3-passive . Функцыя $NextThreadF$ вылічэння нумароў патокаў NTF прадстаўлена на мал. 4. Для СЛАР з 8 радкоў, прызначаных на 4 патокі, што выконваюцца на 2 працэсарах, вектар $NTF1 = \{0, 2, 1, 3, 2, -1, 3, -1\}$ вылічаецца выклікам функцыі з параметрамі $Th = \{0, 0, 1, 1, 2, 2, 3, 3\}$ і $Pr = \{0, 1, 0, 1\}$. Элемент Th_i вектара Th ёсць нумар патоку, які змяшчае радок i , а элемент Pr_i вектара Pr ёсць нумар працэсара, на якім выконваецца паток t . Першы элемент 0 на вектары $NTF1$ азначае, што пасля нармалізацыі радка 0 на працэсары 0 кіраванне застаецца ў патоку 0, а другі элемент 2 азначае, што пасля нармалізацыі радка 1 кіраванне перадаецца патоку 2 на тым жа працэсары 0. Значэнне -1 азначае завяршэнне вылічэнняў на адпаведным працэсары.

У стане 3-passive булевай зменнай $f1$ прысвойваецца значэнне $true$, калі нумар радка s_i больш нумара глабальна актыўнага радка g_i , і аўтамат пераходзіць у стан 7-passive з мэтай чакання прыёму радка $s_i(g_i)$ ад іншых патокаў. Калі выконваецца роўнасць $s_i = g_i$, то радок s_i ўжо з'яўляецца глабальна актыўным, зменнай $f1$ прысвойваецца значэнне $false$, і аўтамат пераходзіць у стан 4-passive . У стане 4-passive аперацыя $\Pi(p, t, s_i, c_i)$ пералічвае пасіўны радок c_i па радку s_i , а наступны пералічваемы радок вызначаецца аперацыяй $succ(c_i)$. Калі гэта пусты радок Λ , булева зменная $f2$ атрымлівае

значэнне $true$, і аўтамат пераходзіць у стан 5-passive . У адваротным выпадку аўтамат вяртаецца ў стан 3-passive . У стане 5-passive , калі радок s_i з'яўляецца апошнім, па якому пералічваецца радок a_i , булева зменная $f5$ атрымлівае значэнне $false$ і аўтамат пераходзіць у стан 2-active . У адваротным выпадку аўтамат пераходзіць у стан 6-passive , дзе нумар радка s_i павялічваецца на адзінку і прысвойваецца нумары першага пералічванага радка c_i , пры гэтым аўтамат вяртаецца ў стан 3-passive . У стане 7-passive паток t чакае з дапамогай аператара $receive(s_i)$ прыёму актыўнага радка s_i ад іншага патоку. Пры прызначэнні патокаў на адзін працэсар, аперацыі пасылкі-прыёму паведамленняў выконваюцца хутчэй, калі на розныя працэсары – больш павольна.

Асаблівасцю працы алгарытму $\mu 1$ к у пасіўных станах $3\text{-passive} - 7\text{-passive}$ з'яўляецца паслядоўны перабор актыўных радкоў s_i , пачынаючы з 0 і канчаючы $a_i - 1$ з мэтай пераліку пасіўных радкоў ад a_i да пустога радка Λ .

Крокі працы алгарытму $\mu 1$ к на СЛАР памерам 8×8 , вырашаемай 4 патокамі, выканваемымі на 2 працэсарах, паказаны на мал. 5 злева. Колькасць крокаў скарацілася на 1 у параўнанні з алгарытмам $\mu 1$, пры гэтым, у адрозненне ад алгарытму $\mu 1$, які выконвае 2 перадачы кіравання паміж патокамі на працэсары ЛП0 і 7 перадач кіравання на працэсары ЛП1, алгарытм $\mu 1$ к выконвае толькі па адной перадачы кіравання на кожным з працэсараў. Высокаўзроўневы аўтамат, які апісвае паводзіны патоку пры зваротным ходзе па матрыцы A , будуюцца аналагічным чынам.

Кааператыўны блочна-паралельны алгарытм $\mu 2$ к

Асноўным прынцыпам пабудовы кааператыўнага алгарытму $\mu 2$ к з'яўляецца мінімізацыя колькасці пераходаў ад пераліку каэфіцы-

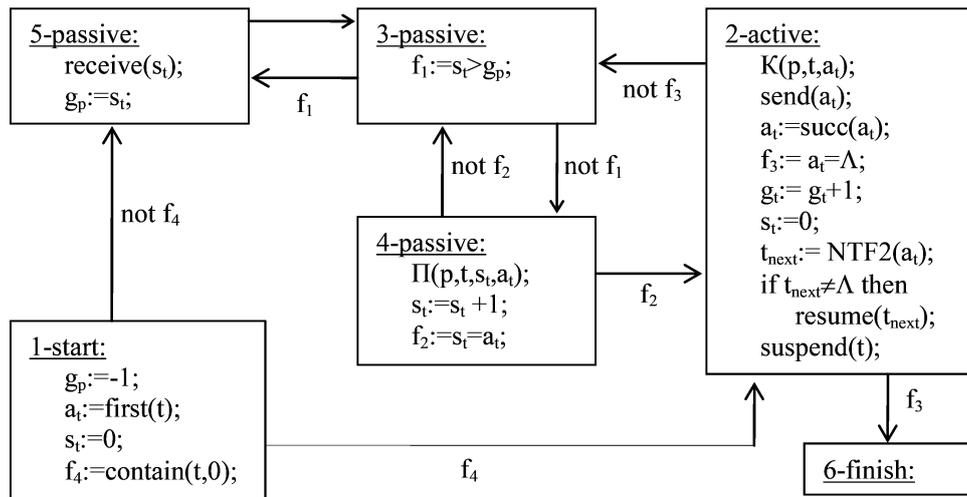
№	ЛП 0			ЛП 1		
1	T0	K0	C0			
2	T0	Π0	C1	T1	Π0	C2
3	T0	K1	C1	T1	Π0	C3
4	T2	Π0	C4	T1	Π1	C2
5	T2	Π0	C5	T1	Π1	C3
6	T2	Π1	C4	T1	K2	C2
7	T2	Π1	C5	T1	Π2	C3
8	T2	Π2	C4	T1	K3	C3
9	T2	Π2	C5	T3	Π0	C6
10	T2	Π3	C4	T3	Π0	C7
11	T2	Π3	C5	T3	Π1	C6
12	T2	K4	C4	T3	Π1	C7
13	T2	Π4	C5	T3	Π2	C6
14	T2	K5	C5	T3	Π2	C7
15				T3	Π3	C6
16				T3	Π3	C7
17				T3	Π4	C6
18				T3	Π4	C7
19				T3	Π5	C6
20				T3	Π5	C7
21				T3	K6	C6
22				T3	Π6	C7
23				T3	K7	C7

μ1к

№	ЛП 0			ЛП 1		
1	T0	K0	C0			
2	T2	Π0	C2	T1	Π0	C1
3				T1	K1	C1
4	T2	Π1	C2	T3	Π0	C3
5	T2	K2	C2	T3	Π1	C3
6	T0	Π0	C4	T3	Π2	C3
7	T0	Π1	C4	T3	K3	C3
8	T0	Π2	C4	T1	Π0	C5
9	T0	Π3	C4	T1	Π1	C5
10	T0	K4	C4	T1	Π2	C5
11	T2	Π0	C6	T1	Π3	C5
12	T2	Π1	C6	T1	Π4	C5
13	T2	Π2	C6	T1	K5	C5
14	T2	Π3	C6	T3	Π0	C7
15	T2	Π4	C6	T3	Π1	C7
16	T2	Π5	C6	T3	Π2	C7
17	T2	K6	C6	T3	Π3	C7
18				T3	Π4	C7
19				T3	Π5	C7
20				T3	Π6	C7
21				T3	K7	C7

μ2к

Малюнок 5. - Кроки працы алгарытмаў μ1к і μ2к на 8 радках, 4 патоках, 2 працэсарах (прамы ход)



Малюнок 6. - Кааператыўны блочна-паралельны алгарытм μ2к рашэння СЛАР (прамы ход)

ентаў аднаго радка да пераліку каэфіцыентаў іншага радка. Пры прызначэнні на адзін працэсар K патокаў, якія змяшчаюць сумесна $S = M/P$ радкоў, міні-мальная колькасць пераходаў роўная $S - 1$. Гэтыя пераходы паміж радкамі могуць павялічыць колькасць перадач кіравання паміж патокамі у параўнанні з алгарытмам μ1к. Ўказаны прынцып добра спалучаецца з размеркаваннем радкоў па патоках у алгарытме μ2, дзякуючы якому вылічэнні эфектыўна размяркоўваюцца і распаралельваюцца на працэсарах. Алгарытм μ2к будзе такім чынам, што цалкам апрацоўваецца бягучы радок матрыцы

СЛАР, а затым выконваецца пераход да апрацоўкі наступнага радка на дадзеным працэсарах, з магчымай перадачай кіравання іншаму патоку. Неабходнай умовай завяршэння пераліку бягучага радка з'яўляецца назапашванне ўсіх папярэдніх радкоў, пералік якіх завершаны.

Дыяграма высокаўзроўневага аўтамата, якая апісвае паводзіны алгарытму μ2к ў патоку t на працэсарах p , паказаная на мал. 6. Дыяграма ўключае 6 станаў, якія функцыянуюць у 4 рэжымах: *start*, *active*, *passive* і *finish*. У пачатковым стане 1-*start* глабальна актыўным радком g_t становіцца пусты радок (з нумарам -1),

актыўным радком a_t становіцца радок $first(t)$, радком s_t , які выкарыстоўваецца для пераліку іншых наступных радкоў, становіцца радок з нумарам 0. Пераход аўтамата ў наступны стан вызначаецца прэдыкатам $contain(t, 0)$ і зменнай f_4 , прымаючай значэнне *true*, калі радок з нумарам 0 ўключаны ў паток t .

У стане *2-active* радок a_t нармалізуецца аперацыяй $K(p, t, a_t)$ і пасылаецца іншым патокам з мэтай пераліку радкоў з большымі нумарамі. Новым значэннем a_t становіцца наступны радок, уключаны ў паток t , а нумар глабальна актыўнага радка g_t павялічваецца на 1. Значэннем s_t становіцца радок з нумарам 0. Наступны актыўны паток t_{next} на працэсары p выбіраецца апэратарам $NTF2(a_t)$ у залежнасці ад нумара радка a_t . Паток t_{next} аднаўляецца апэратарам $resume(t_{next})$, калі гэта не пусты паток, а паток t прыпыняецца апэратарам $suspend(t)$. Пераход аўтамата ў наступны стан *3-passive* або *8-finish* вызначаецца булевай зменнай f_3 , якая прымае значэнне *true*, калі радок a_t з'яўляецца пустым (Λ). Для разгляднага прыкладу, вектар $NTF2 = \{2, 3, 0, 1, 2, 3, -1, -1\}$ нумароў патокаў, якім перадаецца кіраванне пасля завяршэння апрацоўкі радкоў, вызначаецца ў выніку выкліку функцыі *NextThreadF* з параметрамі $Th = \{0, 1, 2, 3, 0, 1, 2, 3\}$ і $Pr = \{0, 1, 0, 1\}$.

У стане *3-passive*, калі $s_t > g_t$, аўтамат пераходзіць у стан *5-passive*, калі ж $s_t = g_t$, аўтамат пераходзіць у стан *4-passive*. У стане *4-passive* аперацыя $P(p, t, s_t, a_t)$ пералічвае радок a_t па радку s_t . Нумар наступнага радка s_t павялічваецца на 1. Калі новы радок s_t супадае з радком a_t , пералік радка a_t ад папярэдніх радкоў скончаны і аўтамат пераходзіць у стан *2-active*. У адваротным выпадку пералік не скончаны, аўтамат вяртаецца ў стан *3-passive*. У стане *5-passive*, аўтамат чакае радок s_t , пералічаны іншымі патокамі. У выпадку атрымання такога радка апэратарам $receive(s_t)$, аўтамат вяртаецца ў стан *3-passive*.

Крокі працы алгарытму μ_2 на СЛАР памерам 8×8 , які выконваецца 4 патокамі на 2 працэсарах, паказаны на мал. 5 справа. Колькасць крокаў скарацілася на 2 у параўнанні з алгарытмам μ_1 , аднак, у адрозненне ад μ_1 , які выконвае па 1-й перадачы кіравання паміж патокамі на кожным працэсары, алгарытм μ_2 выконвае больш, а менавіта, па 3 перадачы на

кожным працэсары. У той жа час, колькасць перадач значна скарацілася ў параўнанні з алгарытмам μ_2 , які выконвае 7 перадач на ЛП0 і 9 перадач на ЛП1. Высокаўзроўневы аўтамат, які апісвае паводзіны патоку пры зваротным ходзе па матрыцы СЛАР, будзеца аналагічным чынам.

Эксперыментальнае даследаванне кааператыўных блочна-паралельных алгарытмаў

Найважнейшымі параметрамі шматпаточных прыкладанняў з'яўляюцца: колькасць выконваемых макра аперацый $K(p, t, a_t)$ і $P(p, t, s_t, a_t)$; даўжыня крытычнага шляху ў ліку макра аперацый (CP); каэфіцыент распаралельвання, ацэньваны як агульная колькасць макра аперацый падзеленае на даўжыню крытычнага шляху (Prl); сярэдняя загрузка працэсара (Ld%); сярэдняя колькасць паведамленняў паміж парай патокаў (MbT); сярэдняя колькасць паведамленняў паміж парай працэсараў (MbP); сярэдняя колькасць паведамленняў ўнутры аднаго працэсара (MopP); сярэдняя колькасць перадач кіравання паміж патокамі на адным працэсары (CTP).

Праведзены тры серыі эксперыментаў, якія выяўляюць змену параметраў алгарытмаў μ_1 , μ_2 , μ_1 к і μ_2 к ў залежнасці ад: памеру матрыцы СЛАР, колькасці патокаў і колькасці працэсараў. Вынікі прадстаўлены ў табл. 1–6. Павелічэнне радкоў СЛАР з 8 да 128 павялічвае лік макра аперацый з 72 да 16512 (табл. 1). Пры выкарыстанні 8 патокаў і 4 працэсараў, даўжыня крытычнага шляху павялічваецца з 36 да 5676 для алгарытму μ_1 і з 30 да 5670 для алгарытму μ_1 к. Для алгарытмаў μ_2 і μ_2 к павелічэнне склала з 36 да 4416, і з 30 да 4230 адпаведна. Як следства, каэфіцыент распаралельвання і загрузка працэсараў вышэй у μ_1 к у параўнанні з μ_1 на 0.1% – 20%, і вышэй у μ_2 к у параўнанні з μ_2 на 4.4% – 20%. Па гэтых параметрах μ_2 к пераўзыходзіць μ_1 к да 34%, прычым перавага ўзрастае з ростам памеру СЛАР. Лік паведамленняў паміж парай патокаў і ўнутры аднаго працэсара ўзрастае з ростам памеру СЛАР для ўсіх алгарытмаў (табл.2). Яно каля 2 разоў вышэй для μ_2 і μ_2 к у параўнанні з μ_1 і μ_1 к. Лік паведамленняў паміж парай працэсараў расце хутчэй для μ_2 і μ_2 к, чым для μ_1 і μ_1 к. Лік перадач кіравання

Таблиця 1. Залежність параметрів CP, Prl і Ld ад колькасці радкоў у матрыцы СЛАР для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 8 патокаў і 4 працэсараў

Лік радкоў СЛАР	Лік макра апераций	Алгарытмы / Параметры											
		μ_1			μ_2			$\mu_{1к}$			$\mu_{2к}$		
		CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%
8	72	36	2.00	50.0	36	2.00	50.0	30	2.40	60.0	30	2.40	60.0
16	272	104	2.62	65.4	104	2.62	65.4	98	2.78	69.4	86	3.16	79.1
32	1056	372	2.84	71.0	336	3.14	78.6	366	2.89	72.1	294	3.59	89.8
64	4160	1436	2.90	72.4	1184	3.51	87.8	1430	2.91	72.7	1094	3.80	95.1
128	16512	5676	2.91	72.7	4416	3.74	93.5	5670	2.91	72.8	4230	3.90	97.6

Таблиця 2. Залежність параметраў MbT, MbP, MonP і CTP ад колькасці радкоў у матрыцы СЛАР для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 8 патокаў і 4 працэсараў

Лік радкоў СЛАР	Алгарытмы / Параметры									
	μ_1 і $\mu_{1к}$			μ_1	$\mu_{1к}$	μ_2 і $\mu_{2к}$			μ_2	$\mu_{2к}$
	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP
8	1	3	2	8	2	1	3	2	8	2
16	2	6	4	18	2	3	6	6	50	6
32	4	12	8	38	2	7	15	14	230	14
64	8	24	16	78	2	15	31	30	974	30
128	16	48	32	158	2	31	63	62	3998	62

Таблиця 3. Залежність параметраў CP, Prl і Ld ад колькасці патокаў для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 64 радкоў у матрыцы СЛАР (4160 макра апераций) і 4 працэсараў

Лік патокаў	Алгарытмы / Параметры											
	μ_1			μ_2			$\mu_{1к}$			$\mu_{2к}$		
	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%
4	1814	2.29	57.3	1184	3.51	87.8	1814	2.29	57.3	1094	3.80	95.1
8	1436	2.90	72.4	1184	3.51	87.8	1430	2.91	72.7	1094	3.80	95.1
16	1256	3.31	82.8	1184	3.51	87.8	1238	3.36	84.0	1094	3.80	95.1
32	1184	3.51	87.8	1184	3.51	87.8	1142	3.64	91.1	1094	3.80	95.1
64	1184	3.51	87.8	1184	3.51	87.8	1094	3.80	95.1	1094	3.80	95.1

Таблиця 4. Залежність параметраў MbT, MbP, MonP і CTP ад колькасці патокаў для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 64 радкоў у матрыцы СЛАР і 4 працэсараў

Лік патокаў	Алгарытмы / Параметры									
	μ_1 і $\mu_{1к}$			μ_1	$\mu_{1к}$	μ_2 і $\mu_{2к}$			μ_2	$\mu_{2к}$
	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP
4	16	16	0	0	0	31	31	0	0	0
8	8	24	16	78	2	15	31	30	974	30
16	4	28	24	238	6	7	31	30	1006	30
32	2	30	28	510	14	3	31	30	1022	30
64	1	31	30	1030	30	1	31	30	1030	30

паміж патокамі на адным працэсары застаецца сталым для $\mu_{1к}$, узрастае для $\mu_{2к}$, хутка ўзрастае для μ_1 і яшчэ хутчэй для μ_2 .

Табл. 3, 4 паказваюць залежнасць параметраў прыкладання ад колькасці патокаў для 64 радкоў у СЛАР (4160 макра апераций) і 4 працэсараў. Для μ_2 і $\mu_{2к}$ даўжыня крытычнага

шляху не залежыць ад колькасці патокаў, пры гэтым $\mu_{2к}$ пераўзыходзіць μ_2 на 8.2%. Пры павелічэнні колькасці патокаў з 4 да 64 крытычны шлях скарачаецца, а каэфіцыент распаралельвання і загрузка працэсараў павялічваюцца на 53.2% для алгарытму μ_1 і на 65.8% для алгарытму $\mu_{1к}$. Згодна з табл. 4, лік паве-

Табліца 5. Залежнасць CP, Prl і Ld ад колькасці працэсараў для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 64 радкоў у матрыцы СЛАР (4160 макра аперацый) і 32 патокаў

Лік працэсараў	Алгарытмы / Параметры											
	μ_1			μ_2			$\mu_{1к}$			$\mu_{2к}$		
	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%	CP	Prl	Ld%
1	4160	1.00	100.0	4160	1.00	100.0	4160	1.00	100.0	4160	1.00	100.0
2	2176	1.91	95.6	2176	1.91	95.6	2146	1.94	96.9	2114	1.97	98.4
4	1184	3.51	87.8	1184	3.51	87.8	1142	3.64	91.1	1094	3.80	95.1
8	688	6.05	75.6	688	6.05	75.6	646	6.44	80.5	590	7.05	88.1
16	440	9.45	59.1	440	9.45	59.1	410	10.15	63.4	350	11.89	74.3
32	316	13.16	41.1	316	13.16	41.1	316	13.16	41.1	254	16.38	51.2

Табліца 6. Залежнасць MbT, MbP, MonP і CTP ад колькасці працэсараў для алгарытмаў μ_1 , μ_2 , $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$, 64 радкоў у матрыцы СЛАР і 32 патокаў

Лік працэсараў	Алгарытмы / Параметры										
	μ_1 і $\mu_{1к}$			μ_1	$\mu_{1к}$	μ_2 і $\mu_{2к}$			μ_2	$\mu_{2к}$	
	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP	MbT	MbP	MonP	CTP	CTP	
1	2	0	124	2106	62	3	0	126	4154	126	
2	2	62	60	1046	30	3	63	62	2070	62	
4	2	30	28	510	14	3	31	30	1022	30	
8	2	14	12	230	6	3	15	14	486	14	
16	2	6	4	66	2	3	7	6	194	6	
32	2	2	0	0	0	3	3	0	0	0	

дамленняў паміж парай патокаў памяншаецца з 16 да 1, лік паведамленняў паміж парай працэсараў павялічваецца з 16 да 31, а колькасць паведамленняў на адным працэсары павялічваецца з 0 да 30 для алгарытмаў μ_1 і $\mu_{1к}$. Для алгарытмаў μ_2 і $\mu_{2к}$, лік паведамленняў паміж парай патокаў памяншаецца з 31 да 1, а лік паведамленняў паміж парай працэсараў і паміж патокамі на адным працэсары нязменны і роўны 31 і 30 адпаведна. Лік перадач упраўленняў паміж патокамі на адным працэсары ўзрастае з 0 да 30 для $\mu_{1к}$, застаецца сталым і роўным 30 для $\mu_{2к}$, хутка ўзрастае з 0 да 1030 для μ_1 і яшчэ хутчэй ўзрастае з 0 да 1030 для μ_2 .

Табл. 5, 6 паказваюць залежнасць параметраў шматпатоковага праграмага прыкладання ад колькасці працэсараў для 64 радкоў у СЛАР і 32 патокаў. Для алгарытмаў μ_1 і μ_2 , пры павелічэнні колькасці працэсараў з 1 да 32 даўжыня крытычнага шляху паменшылася з 4160 да 316, каэфіцыент распаралельвання вырас з 1.0 да 13.16 і загрузка працэсараў паменшылася з 100% да 41.1%. Па гэтых параметрах алгарытм $\mu_{1к}$ даў некалькі лепшых вынікаў. Самым лепшым аказаўся алгарытм $\mu_{2к}$, які скараціў даўжыню крытычнага шляху да 254 і павялічыў каэфіцыент распаралельвання да 16.38

(на 24.4%). Відавочна, што лік паведамленняў паміж парай патокаў не залежыць ад колькасці працэсараў. Дынаміка змяншэння сярэдняй колькасці паведамленняў паміж парай працэсараў і колькасці паведамленняў на адным працэсары амаль аднолькавая для ўсіх алгарытмаў, з 62–63 да 2–3 і з 124–126 да 0 адпаведна. Колькасць перадач упраўлення паміж патокамі на працэсары памяншаецца для ўсіх алгарытмаў з ростам колькасці працэсараў, але ў розным дыяпазоне. Менш за ўсё перадач у алгарытму $\mu_{1к}$ (0–62), затым у алгарытму $\mu_{2к}$ (0–126, каля 2 разоў больш). Алгарытмы μ_1 і μ_2 выконваюць нашмат больш перадач, 0–2106 і 0–4154 адпаведна.

Заклучэнне

Прапанаваныя кааператыўныя блочна-паралельныя алгарытмы $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$ значна пераўзыходзяць вядомыя алгарытмы μ_1 і μ_2 па даўжыні крытычнага шляху, каэфіцыенту распаралельвання, загрузцы працэсараў і перадачам кіравання паміж патокамі на працэсары. Параўнанне кааператыўных алгарытмаў $\mu_{1к}$ і $\mu_{2к}$ паміж сабой паказвае, што $\mu_{1к}$ дае менш перадач кіравання паміж патокамі, аднак $\mu_{2к}$ дае больш кароткі крытычны шлях і больш значную загрузку працэсараў.

ЛИТАРАТУРА

1. **Корнеев, В. Д.** Примеры параллельного программирования на МВС-1000 / В. Д. Корнеев // ИВМиМГ СО РАН [Электронный ресурс]: – Режим доступа: http://www2.sssc.ru/Publikacii/Primery_Prl/Primery.htm – Дата доступа: 07.04.2014.
2. **Прихожий, А. А.** Исследование методов реализации многопоточных приложений на многоядерных системах / А. А. Прихожий, О. Н. Карасик // Информатизация образования, 2014, № 1. – С. 43–62.
3. **Прихожий, А. А.** Кооперативная модель оптимизации выполнения потоков на многоядерной системе / А. А. Прихожий, О. Н. Карасик // Системный анализ и прикладная информатика, 2014, № 4. – С. 13–20.

Поступила 7.7.2015

Prihozhy A., Karasik O.

COOPERATIVE BLOCK-PARALLEL ALGORITHMS FOR TASK EXECUTION ON MULTI-CORE SYSTEM

The problem of balancing the computational load among the cores of a multi-core system and increasing the efficiency of interaction among threads in a multi-thread application is considered. The cooperative block-parallel algorithms of solving complex tasks that can be decomposed into subtasks, which decrease the number of control transfers among threads, reduce the critical path length in a parallel implementation and increase the cores load are proposed.

PEI PING, YURY N. PETRENKO

MESH NETWORK SIMULATION

Belarusian National Technical University

A Mesh network simulation framework which provides a powerful and concise modeling chain for a network structure will be introduced in this report. Mesh networks have a special topologic structure. The paper investigates a message transfer in wireless mesh network simulation and how does it work in cellular network simulation. Finally the experimental result gave us the information that mesh networks have different principle in transmission way with cellular networks in transmission, and multi – hop routing could provide robustness and load balancing to communication in wireless mesh networks.

Introduction

The traffic routing and Internet gateway selection play important role in determining when mesh networks primarily used for internet access. The gateway may easily become a bottleneck to limiting the achievable capacity of the entire network. Each mesh node need to distribute the traffic loads among multi – hop gateways in order to ensure evenly utilization of Internet connections.

To model the mesh network as a queuing network, it is necessary to characterize each mesh node with a correspondent queuing system, which should capture the most important aspects of the queuing and forwarding processes. Since we consider mesh networks composed of three types of mesh nodes, we have introduced three different classes of stations in our equivalent queuing network, which are shown in Fig 1, [1]. First of all,

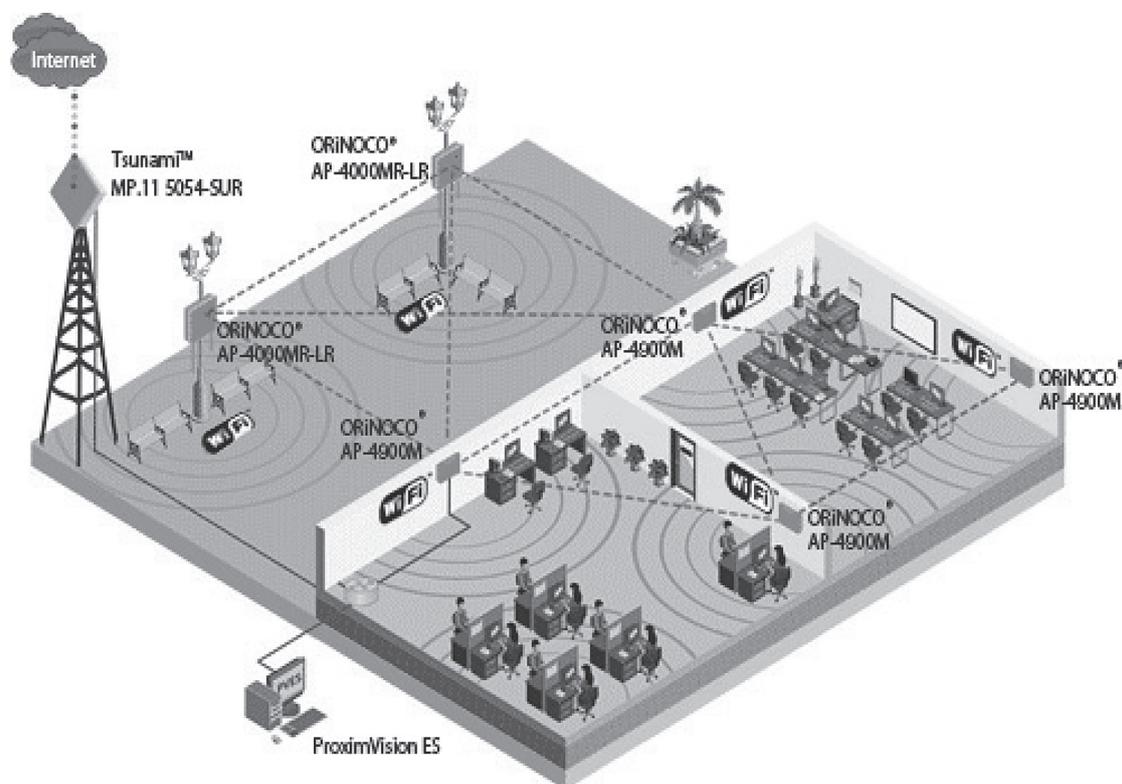


Figure 1. - Proxim Orinoco AP-4900 MR Indoor, Mesh Network Access point (Keison Internation Ltd, 2013)

let us assume that in the mesh network there are nO mesh routers, nP provider gateways, and nR residential gateways, being $N = nO + nP + nR$ the total number of nodes in the mesh network. Each mesh router will receive user-generated traffic with an average rate λe , i , and packets from the other stations of the queuing network.

For instance, if too many mesh nodes select the same gateway as address point to the Internet, congestion may increase excessively on the wireless channel, the Internet connection of the gateway can get overloaded. This is especially important for the heterogeneous mesh networks considered in this study, because low-speed Internet gateways may easily become a bottleneck to limiting the achievable capacity of the entire network. In addition a load-unaware gateway selection can lead to an unbalanced utilization of network resources.

Wireless mesh networks are primarily used to provide Internet access by sharing the networking connections of a limited number of gateways. If traffic is routing in the mesh without considering load distribution, it will causes a significant reduction of the network capacity. To address this issue, in this paper we first develop a queuing network model that accurately predicts the residual capacity of paths in heterogeneous mesh networks, and precisely identify network bottlenecks. By taking advantage of this model, we design a novel Load-Aware Route Selection algorithm, named LARS, which improves the network

capacity. This objective is obtained by allowing each mesh node to distribute the traffic load among multi-hop gateways in order to ensure evenly utilization of Internet connections. Simulation results show that LARS significantly outperforms shortest path routing using contention aware link costs, achieving throughput improvements of considered network scenarios.

Construction a mesh network simulation

Wireless Mesh Network (WMN) has become one of the important technologies for human being. It has increased to a role in coverage of Internet. Several cities already used Wireless Mesh networks during the researching time.

In this section, we discuss the design and different structure between cellular network and Wireless Mesh network in an experiment. In the past years, experiment was a method which very popular in wireless mesh network simulation. In a simulation, network could be easily constructed and test. The data also could collected in an easily way.

At first we using Packet tracer to construct a mesh network simulation parameters to observed in the real networks. It should be notice that the cable which in packet tracer is real line. But it should be wireless in a mesh network. The cable used here only easy for simulation test. We can see the mesh network topologic as same as a spider mesh. It is a point to point measurement, Fig 2, [2]. We design the topologic structure in

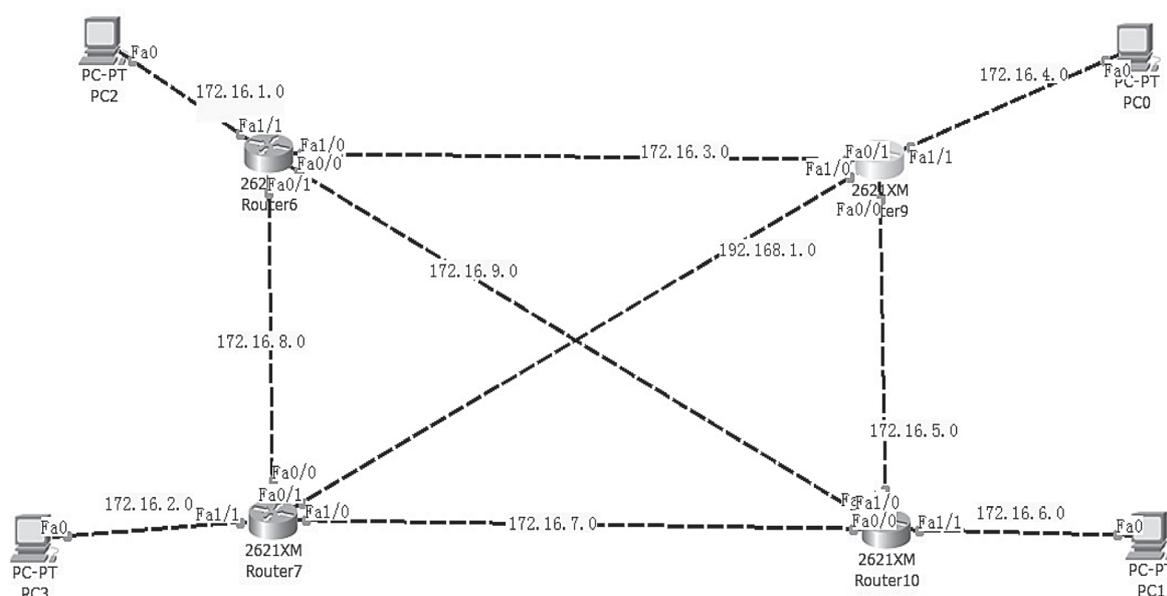


Figure 2. - Mesh Network topology

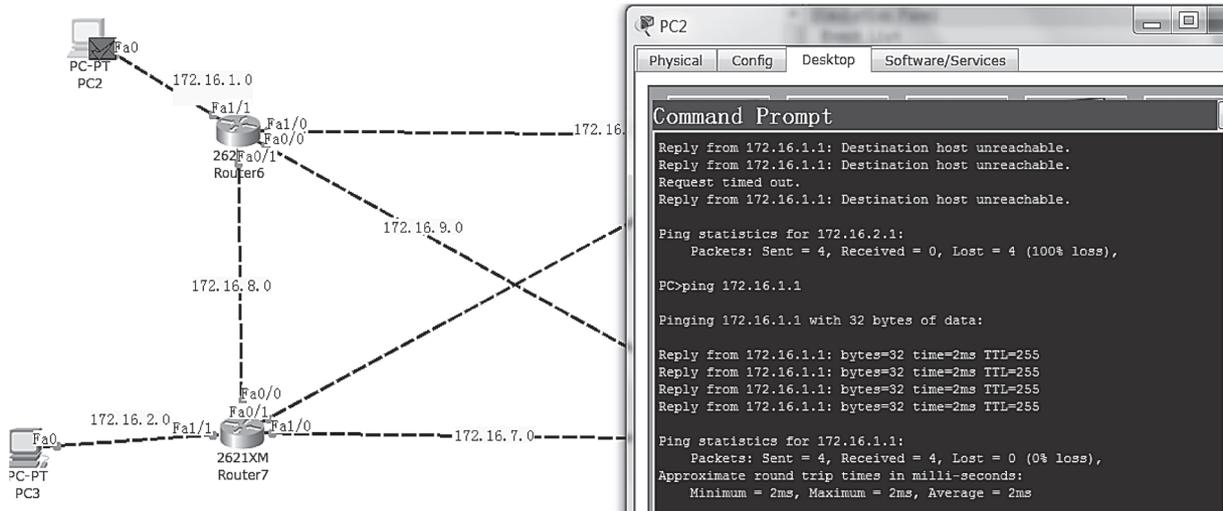


Figure 3. - Mesh Network testing

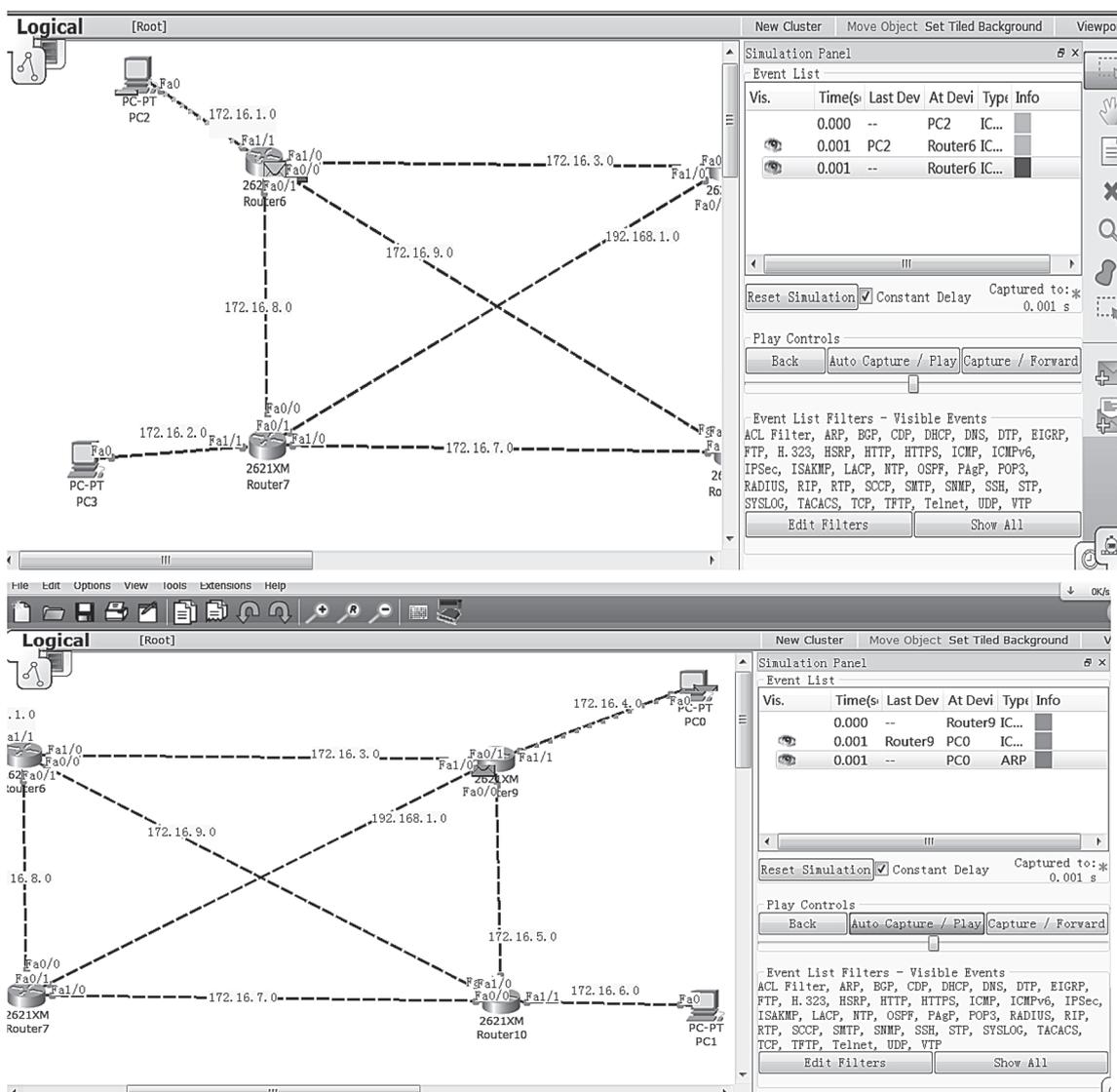


Figure 4. - Message transform in a Mesh Network

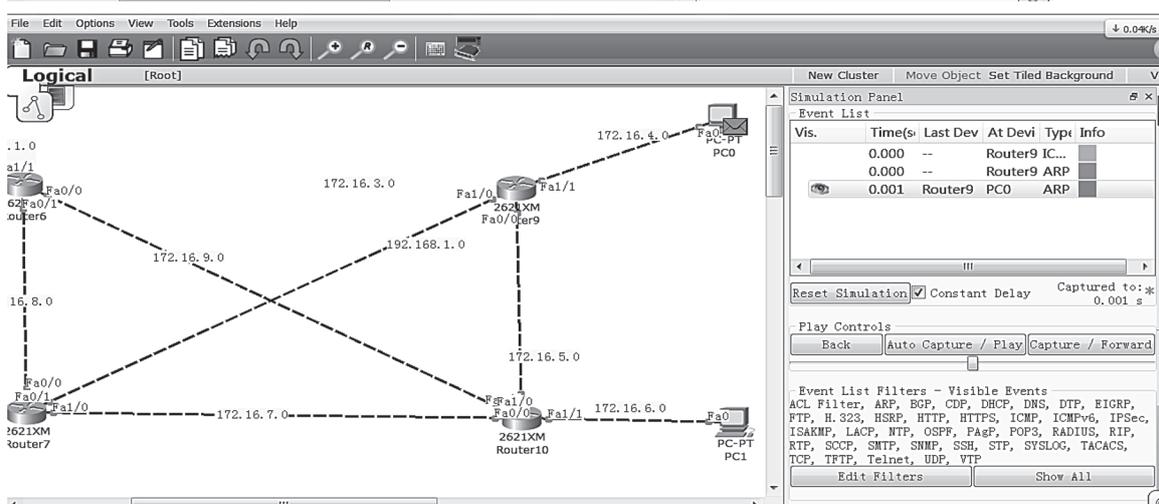
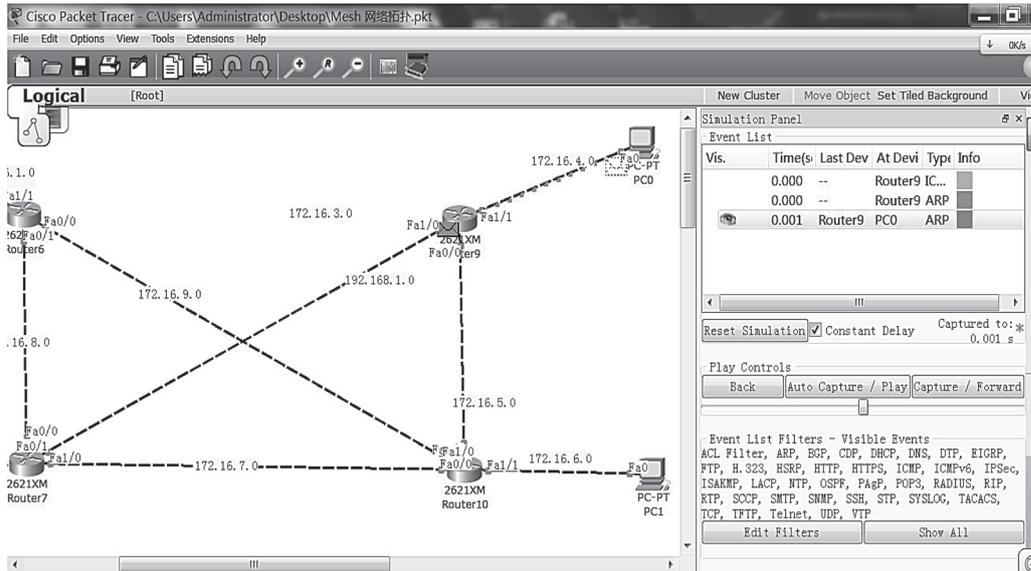
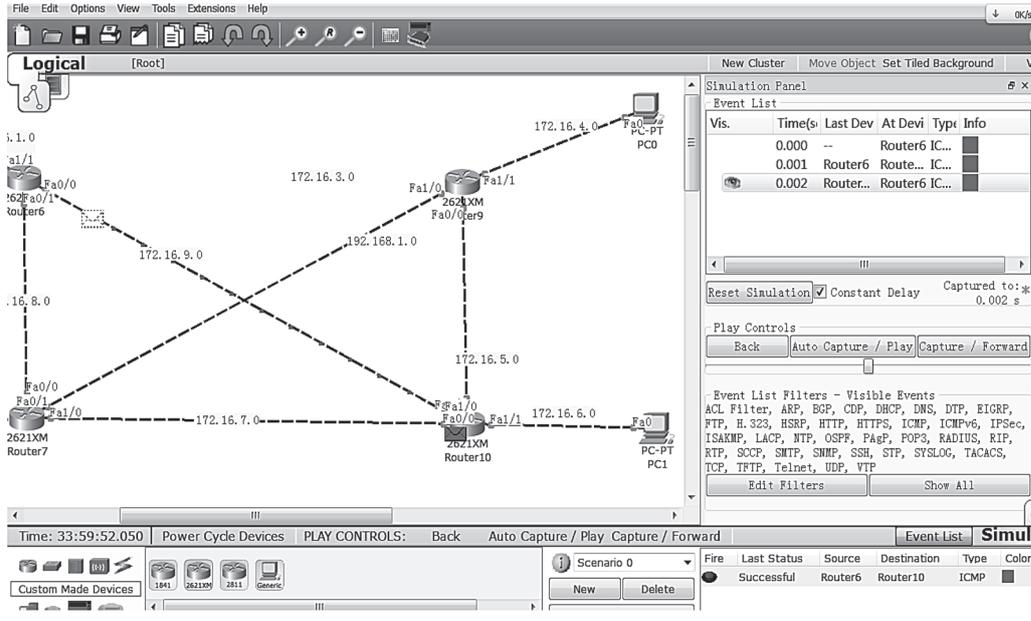


Figure 5. - Automatic choosing pass way

the next step, and distribute the IP address for each network segment.

After the configuration work finished, we need to do a test for networking to make sure each point could transfer information fluently. In this case, we are doing the test in «ping» Fig 3, [3]. The information package has send by original host to the destination host in 4 times, then the destination host will reply the information package to original host in 4 times if the network configuration is correct.

As we have shown, the networking has successfully in construction. For example, we used

PC-PT (PC2) as a host original sending the message to P C-PT (PC0). The information is transforming way as it is shown in Fig 4. Message is going to Router 6 in the first, passing to router 9 in the second. Finally the host P C-PT (PC0) will get the message which comes from the original host.

We did the test about Mesh network in a perfect state. However the biggest different from cellular network is how does it work when there is a link between each router broken or if the nearest node due to high information flows and congestion. Data can be re-selected a small flow path for transmission in automatically [5]. According to

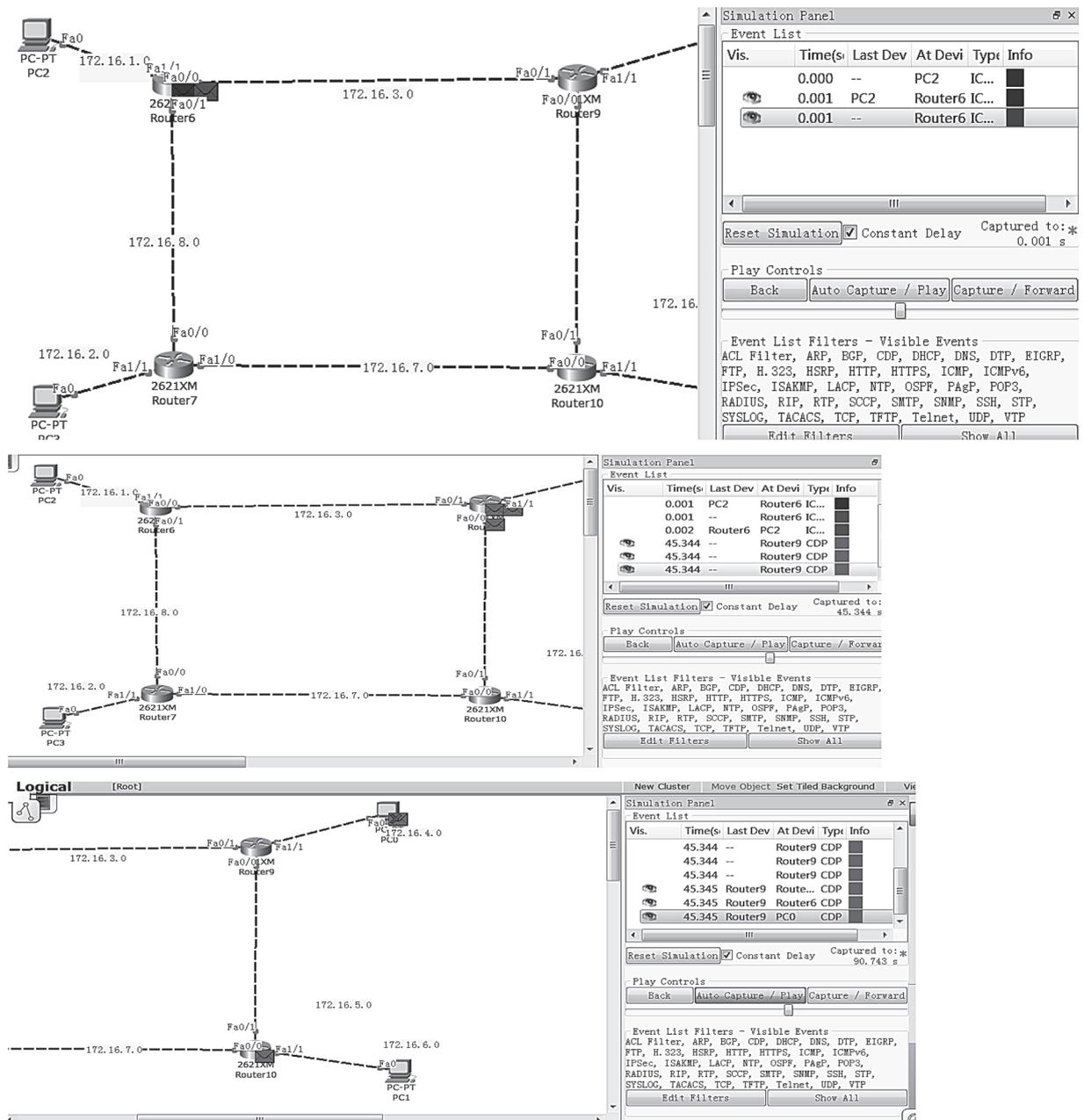


Figure 6. - Message passing in a normal network

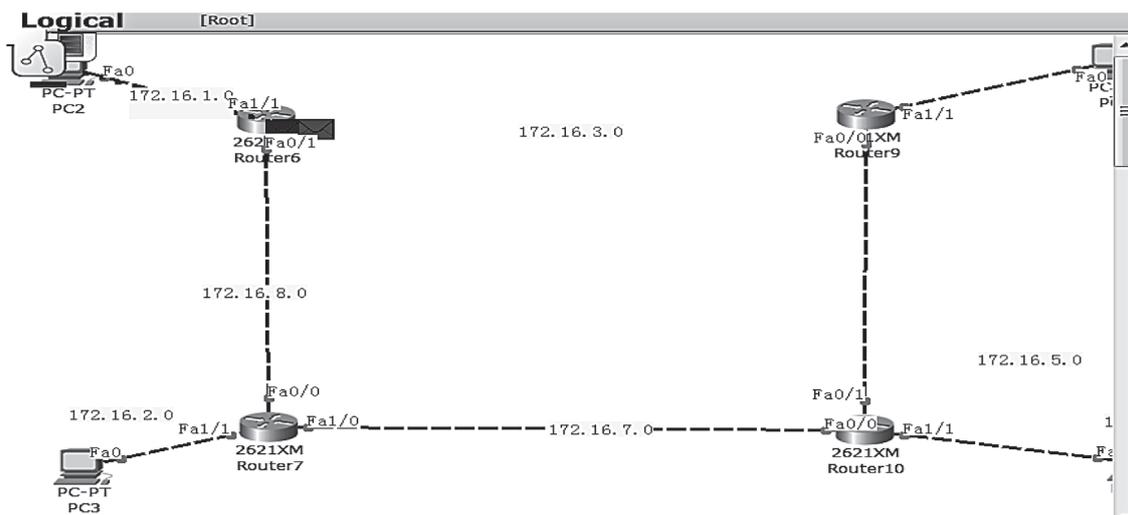


Figure 7. - Message passing way in a cellular network

the network situation, the data packets could from one node transmit to a few multiple nodes, finally arrived to the destination from these multiple nodes. We cut down the link between the Router 6 and Router 9. Of course the message could transform between these two devices. The message passing on Internet is the same as the Fig. 5.

Construction a cellular network simulation

As the experiment shown, we can see the message passing way from router 6 to router 10, then from router 10 to router 9. Finally the PC-PT (PC 0) will get the message which from the original host. In a normal networking, the message transforms in different way [6]. As we have mention before, the message is transformed in router 6 to router 9 if PC-PT (PC2) as a host original sending the message to PC-PT (PC0), Fig. 6. However, when the link between router 6 and router 9 has broken, the message transform has

changed. The message directed first from the host PC-PT (PC2) to router 6, then passing router 7 and router 10, finally arrived to router 9. It means that there are two more routers than a mesh point to point topologic, Fig 7, [7].

Conclusion

As a result of provided computer experiment and simulation we understand that the cellular network will totally does not work if there will be a main link broken. In single-hop network, if one node fails, the entire network will subsequently paralyzed. However, Mesh network does not depend on a particular performance of a single node. Mesh networks support many different ways from the original host to destination host. When a router fails in mesh network, the information is transfer through an alternate path to other routers. As a result mesh network has more robust structure than single-hop network.

REFERENCE

1. **Thomas, S.** Experimental Evaluation of Multi –path Routing in a Wireless Mesh Network Inside a Building / S. Thomas, O. Stefan, B. Torsten. – Bern: University of Bern, 2009. – 13 pp.
2. **Hossain, E.** Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols / E. Hossain, K. K. Leung. – Manitoba: Department of electrical & computer engineering, university of Manitoba, 2008. – 333 pp.
3. **Lan, A.** Wireless Mesh Networks / A. Lan, X. D. Wang. – John Wiley & Son Ltd, 2009. – 324 pp.
4. **Gilbert, H.** Wireless mesh networks / H. Gilbert – Taylor & Francis, 2005–144 pp..
5. **Gkelias, A.** Multiple Antenna Techniques for Wireless Mesh Networks / A. Gkelias, K. K. Leung. – London: Department of electrical & computer engineering Imperial College – 33 pp.
6. **Ping, P.** Mesh networks / P. Ping // [электронный ресурс]. режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/12210> – дата доступа: 15.01.2015.
7. **Ping, P.** Mesh Network Simulation / P. Ping // [электронный ресурс]. режим доступа: <http://rep.bntu.by/handle/data/122208> – дата доступа: 15.01.2015.

Поступила 10.01.15

Пей Пинг, Юрий Н. Петренко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯЧЕИСТЫХ СЕТЕЙ

Рассматриваются основы моделирования ячеистой сети, которые обеспечивает достоверное и краткое представление сетевой структуры. Эти основы имеют специфические топологические структуры. Моделирование позволяет выявить отличие беспроводной ячеистой сети и сотовой сети. Эти две сети, имеющие различный принцип работы, проанализированы экспериментальным путем с помощью разработанной модели. Представлен эксперимент, который позволил определить задержку при передаче сообщения «точка-точка» и определить путь маршрутизации. Мульти – хоп маршрутизации может обеспечить робастность и балансировку нагрузки для связи в беспроводных сетях.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

ГУРСКИЙ Н. Н., НАЖЖАРИН М.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БОЛЬШЕГРУЗНОЙ МАШИНЫ С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Белорусский национальный технический университет

Рассмотрена модель прямолинейного курсового движения мобильной машины с тяговым электрическим двигателем постоянного тока. Управление движением обеспечивает контроллер по замкнутой классической схеме с обратной связью. Приведена математическая модель электрического двигателя постоянного тока с учетом диссипации энергии в подшипниках ротора. Расчетная схема мобильной машины включает задатчик скорости, контроллер, тяговый электрический двигатель, редуктор, трансмиссию и поступательно движущуюся массу на упруго-диссипативном колесе. Представлены результаты моделирования движения машины в виде временных процессов изменения управляющих сигналов, напряжения и тока в обмотках двигателя, а также тяговой мощности, развиваемой на колесе.

Введение

Наиболее реальный путь достижения высоких показателей транспортных средств, по мнению специалистов, – использование электромеханической трансмиссии вместо чисто механической. Как известно, такая замена дает целый ряд преимуществ [1]. В настоящее время применяются различные кинематические схемы, в которых электропривод является одной из основных составляющих системы управления движением.

Чтобы синтезировать множество возможных вариантов конструктивного исполнения транспортных средств и выполнить анализ работы силовых устройств электрического и механического характера, нужны имитационные компьютерные модели [2], одна из которых рассматривается в данной статье.

Математическая модель адаптивной системы управления большегрузной машиной

Рассмотрим электромеханическую систему управления движением мобильной машины (объект управления). В качестве исполнительного механизма используется электропривод с двигателем постоянного тока, ось которого соединяется с объектом управления соединительной муфтой, имеющей нелинейные упруго-диссипативные свойства. Расчетная схема системы показана на рисунке 1.

Уравнения движения электромеханической следящей системы мобильной машины с электрическим приводом постоянного тока с учетом диссипации энергии в подшипниках привода и объекта, в том числе типа сухого трения, а также нелинейных упруго-диссипатив-

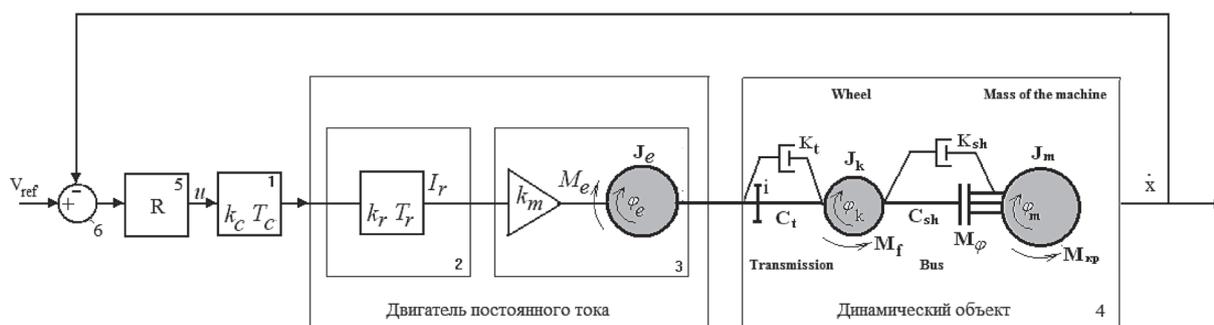


Рисунок 1. - Расчетная электромеханическая схема динамики машины

ных свойств соединительной муфты, имеют вид:

$$\begin{cases} T_c \dot{E}_c + E_c - k_c u = 0, \\ T_r \dot{I}_r + I_r - k_r E_c + k_m k_r \dot{\varphi}_e = 0, \\ J_e \ddot{\varphi}_{e1} + (B_1 \dot{\varphi}_{e1} + M_1 \operatorname{sgn} \dot{\varphi}_{e1}) + \\ + [C_t(\varphi_e - i\varphi_k) + K_t(\dot{\varphi}_{e1} - i\dot{\varphi}_k)] = M_e, \\ M_e = k_m I_r, \\ J_k \ddot{\varphi}_k - [C_t(\varphi_e - i\varphi_k) + K_t(\dot{\varphi}_{e1} - i\dot{\varphi}_k)] = M_c, \\ M_c = [C_{sh}(\varphi_k - \varphi_m \frac{x}{r_k}) + K_{sh}(\dot{\varphi}_k - \frac{\dot{x}}{r_k})], \\ J_m \ddot{\varphi}_m - M_c = -M_{kp}, \\ x = \varphi_m r_k, \\ \dot{x} = \dot{\varphi}_m r_k, \\ \dot{\varphi}_e|_{t=0} = \dot{\varphi}_{e0}, \varphi_e|_{t=0} = \varphi_{e0}; \\ \dot{\varphi}_k|_{t=0} = \dot{\varphi}_{k0}, \varphi_k|_{t=0} = \varphi_{k0}; \\ \dot{\varphi}_m|_{t=0} = \dot{\varphi}_{m0}, \varphi_m|_{t=0} = \varphi_{m0}. \end{cases} \quad (1)$$

Принятые обозначения: I – усилитель управляющего сигнала (k_c – коэффициент усиления, T_c – постоянная времени, $E_{\min} \leq E_c \leq E_{\max}$ – выходное напряжение); 2 – электрическая часть двигателя (k_r – коэффициент усиления тока, T_r – постоянная времени, $I_{\min} \leq I_r \leq I_{\max}$ – ток ротора); 3 – механическая часть двигателя (k_m – паспортный параметр, J_e – момент инерции ротора, φ_e – угол поворота ротора; B_1 – коэффициент вязкого сопротивления в опорах ротора двигателя, M_1 – сухое трение в опорах ротора двигателя в статическом положении); 4 – модель мобильной машины (см. [5]); 5 – регулятор ($u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$ – управляющий сигнал); 6 – элемент сравнения; J_k – момент инерции колеса; φ_k – угол поворота колеса; r_k – радиус колеса; J_m – момент инерции маховика, эквивалентного поступательно движущейся

массе машины; φ_m – угол поворота маховика; M_f – момент сопротивления качению колеса; M_{kp} – момент, создаваемый внешней силой нагрузки; C_t – жесткость вала трансмиссии; C_{sh} – жесткость шины; i – передаточное отношение редуктора; M_φ – момента сцепления колеса с дорогой; K_t, K_{sh} – коэффициенты вязкого сопротивления соответственно вала трансмиссии и шины; x – путь, пройденный машиной; \dot{x} – текущая скорость машины; v_{ref} – желаемая скорость машины.

Имитационная модель динамики машины

В соответствие с принятой расчетной схемой и системой уравнений (1) была построена компьютерная модель в среде Matlab-Simulink, показанная на рисунке 2. Эта модель состоит из задатчика курсовой скорости машины, контроллера, электрического двигателя и блока, моделирующего механическую часть мобильной машины.

В качестве контроллера используется PID-регулятор, значение выходной величины которого, описывается выражением:

$$u(t) = k_p \Delta(t) + k_i \int_0^t \Delta(t) d\tau + k_d \frac{d\Delta(t)}{dt},$$

где k_p, k_i, k_d – соответственно коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора; $\Delta(t) = v_{ref}(t) - \dot{x}(t)$ – рассогласование заданной (желаемой) и текущей скоростей в момент времени t .

Модель электрического двигателя постоянного тока (блок Power_block_DC) в развернутом виде представлена на рисунке 3. Как видно, она состоит из двух апериодических звеньев первого порядка – усилителей напряжения и тока с соответствующими ограничителями величин, умножительного блока k_m – паспорт-

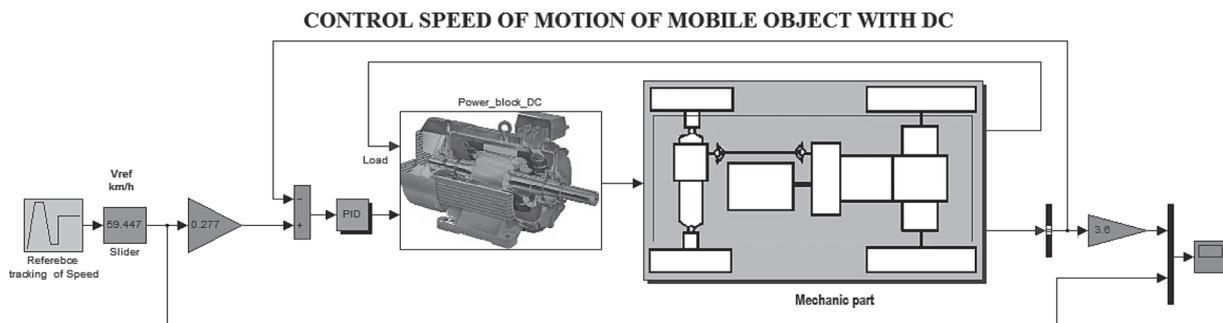


Рисунок 2. - Компьютерная модель машины с электроприводом постоянного тока

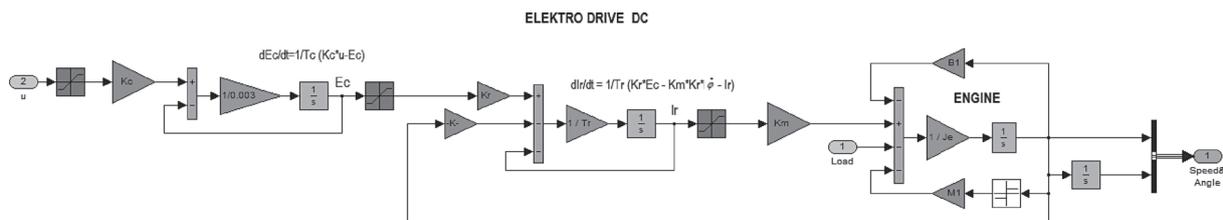


Рисунок 3. - Simulink модель двигателя постоянного тока

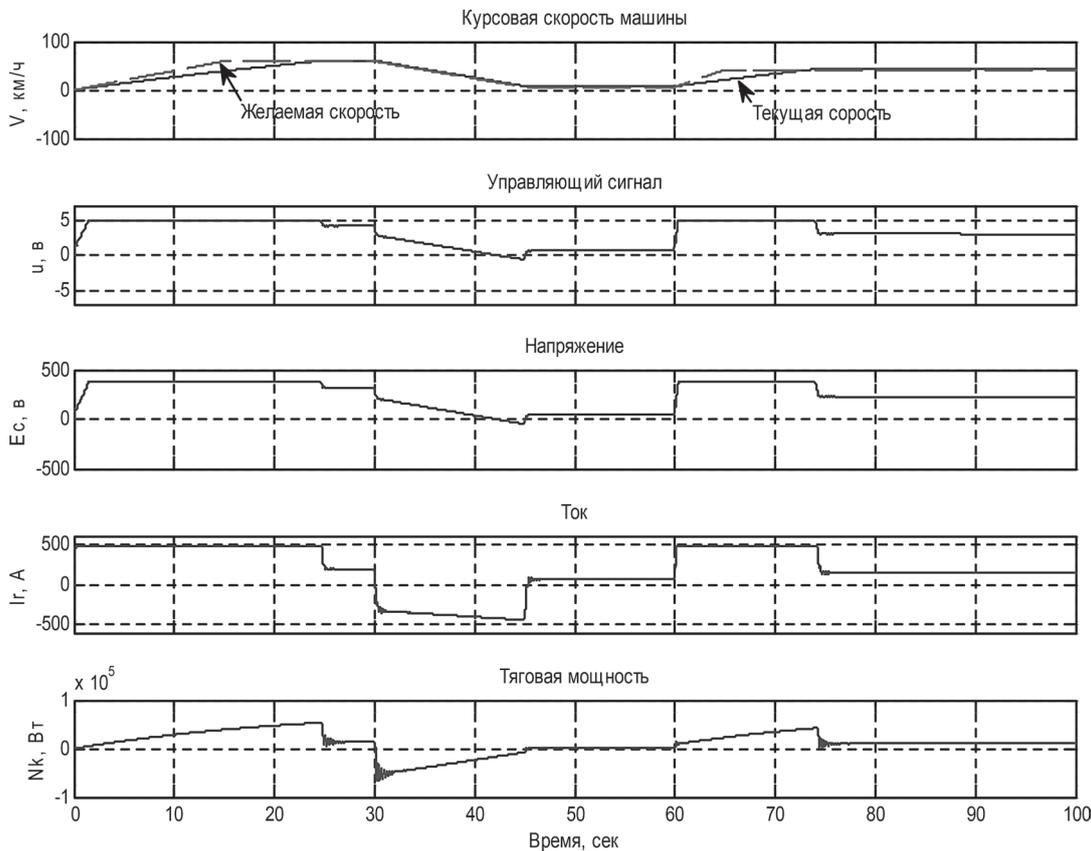


Рисунок 4. - Диаграмма временных процессов при изменении скорости машины

Исходные значения параметров электрического двигателя

Обозначение	Значение	Ед. измерения	Обозначение	Значение	Ед. измерения
k_c	76		I_{min}	-500	<i>A</i>
T_c	0.003	<i>c</i>	I_{max}	500	<i>A</i>
E_{min}	-380	<i>в</i>	k_m	0.45	
E_{max}	380	<i>в</i>	J_e	2.74	кг·м ²
k_r	5		B_1	0.1	н·м·с/рад
T_r	0.037	<i>c</i>	M_1	0.02	н·м·с/рад
u_{min}	-5	<i>в</i>	u_{max}	5	<i>в</i>

ный параметр электродвигателя, приводящий ток к моменту, а также колебательного звена второго порядка, описывающего механическую часть электрического двигателя с трением в опорах ротора.

Параметры электрического двигателя, принятые в расчетах, приведены в таблице.

Численные значения параметров механической части машины описаны в [5].

Результаты моделирования

На рисунке 4 представлены графики переходных процессов (текущей скорости, изменения управляющего сигнала, напряжения и тока

в обмотках электродвигателя) при желаемом изменении скоростного режима большегрузной машины (см. график «Желаемая скорость»).

Временные характеристики приведенных процессов получены при управлении тяговым электрическим двигателем контроллером со следующим законом управления

$$u(t) = 2\Delta(t) + 0.11 \int_0^t \Delta(t) dt + 2 \frac{d}{dt} \Delta(t).$$

Мощность, затрачиваемая на движение (тяговая мощность машины), которая должна поступить на ведущие колеса для преодоления сопротивления движению, вычисляется по формуле

$$N_k = P_k \dot{x},$$

где P_k – окружная сила, развиваемая колесом.

Как видно из представленных графиков, используемый контроллер с выбранными параметрами на этапе разгона машины отрабатывает с небольшим запаздыванием. В тоже время этап торможения практически полно-

стью совпадает с заданной траекторией, определяемой задатчиком движения. Видно также, что управляющий сигнал, напряжение и ток в обмотках двигателя на этапе разгона выходят на заданные ограничения, чем и объясняется отставание текущей скорости машины от желаемой. Тяговая мощность, затрачиваемая на достижение курсовой скорости машины в 60 км/ч за 25 сек, достигает при принятых массовых параметрах и параметрах сопротивления 50 Квт.

Заключение

Разработанные модели электрического двигателя, мобильной машины и регулятора, с полученными параметрами, позволяют провести вычислительный эксперимент по управлению объектами с электроприводами и проанализировать как механические, так и электрические характеристики отдельных используемых блоков и элементов и, в целом, дать оценку эффективности динамики мобильной подвижной системы, в том числе, большегрузной машины, трактора и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Златин, П. А.** Электромобили и гибридные автомобили / П. А. Златин, В. А. Кеменов, И. П. Ксеневич. – Москва: Агроконсалт, 2004. – 413 с.
2. **Гурский, Н. Н.** Моделирование и оптимизация колебаний многоопорных машин: монография / Н. Н. Гурский, Р. И. Фурунжиев. – Минск: БНТУ, 2008. – 296 с.
3. **Гурский, Н. Н.** Виртуальное проектирование ходовой части мобильных машин: монография / Н. Н. Гурский, Ан. М. Захарик, Ал. М. Захарик. – Минск: БНТУ, 2010. – 174 с.
4. **Белоусов, Б. Н.** Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. Конструкция. Теория. Расчет. / Б. Н. Белоусов, С. Д. Попов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 728 с.
5. **Гурский, Н. Н.** Simulink-модель движения большегрузной машины с нейро-контроллером в контуре управления / Н. Н. Гурский, М. Нажжарин // Системный анализ и прикладная информатика. – 2014. – № 4 – С. 32–38.
6. **Фираго, Б. И.** Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2007.

Поступила 10.03.15

Hurski N., Najjarin M.

SIMULATION MODELS OF HEAVY TRUCKS TRAFFIC CONTROL WITH ELECTRIC DC DRIVE

A model of the straight course of movement of the mobile machine with a traction electric motor DC. Traffic management controller provides a closed classical scheme with feedback. The mathematical model of the electric DC motor with the energy dissipation in the rotor bearings. Design scheme of mobile machines include speed dial controller, traction electric motor, gearbox, transmission and progressively moving mass on the elastic-dissipative wheel. The results of the simulation of the machine in the form of temporary processes of change control signals, voltage and current in the windings of the motor and traction power developed on the wheel.

ОДНОЛЬКО Д. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЕЗДАТЧИКОВОГО ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Белорусский национальный технический университет

Разработана математическая имитационная модель системы косвенного бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем. Исследована чувствительность системы электропривода к параметрическим возмущениям, в частности, к изменениям активных сопротивлений статора и ротора двигателя. Представлен анализ качества работы системы: точности оценивания угловой скорости ротора и стабильности динамических свойств системы, при использовании алгоритмов параметрической идентификации асинхронного двигателя и без них.

Введение

В системах векторного управления без датчика скорости (бездатчиковых системах), в зависимости от их структуры, возможна различная чувствительность к параметрическим возмущениям асинхронного двигателя (АД). Известны структуры [1] бездатчикового управления с низкой чувствительностью к изменениям электромагнитных параметров АД, сохраняющие приемлемые динамические показатели во всем диапазоне изменений электромагнитных параметров. Однако обеспечение робастности к параметрическим возмущениям в таких системах сопряжено с трудностями синтеза управления.

Вместе с тем, на практике часто находят применения системы косвенного бездатчикового векторного управления [2], недостатком которой является высокая чувствительность к изменениям параметров. Преимущества таких систем: простая структура наблюдателя скорости и более простые методы синтеза управления. Для повышения качества работы таких систем, необходимо применять алгоритмы параметрической идентификации двигателя [3], что позволит отслеживать изменения параметров и корректировать настройки наблюдателя скорости и регуляторов. Учитывая высокую производительность микропроцес-

сорной техники, на основании которой реализуется в настоящее время управление в электроприводе (ЭП) [4], возможно обеспечить согласованную работу алгоритмов идентификации и алгоритмов управления приводом.

В процессе функционирования частотно-регулируемого ЭП наиболее сильно (в 2 раза [3]) могут изменяться активные сопротивления статора и ротора. Изменение же индуктивностей не так существенно. Изменения активных сопротивлений статора и ротора АД по сравнению с расчетными влияет не только на динамические показатели ЭП, а так же и на энергетические характеристики АД. Так, с увеличением сопротивлений мощность двигателя уменьшается, изменяется его механическая характеристика, уменьшается критический момент. При уменьшении сопротивлений располагаемая мощность АД возрастает, однако снижается запас устойчивости системы ЭП. Следовательно, даже при идеально точном учете изменений параметров система ЭП не станет инвариантна к их изменениям. Однако, возможно улучшение динамических свойств в условиях параметрических возмущений. Таким образом, применение идентификации и перенастройка устройства управления по ее результатам должны улучшить качество функционирования системы бездатчикового косвенного векторного управления.

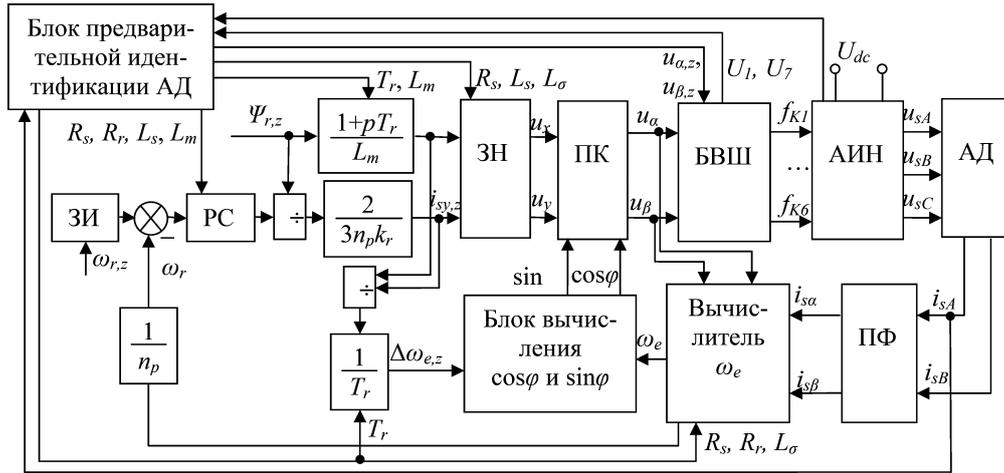


Рисунок 1. - Функциональная схема косвенного бездатчикового векторного управления ЭП: ЗИ – датчик интенсивности; РС – регулятор скорости; ЗН – блок задания напряжения; ПК – блок прямого преобразования координат; ПФ – блок прямого преобразования фаз; БВШ – блок векторной ШИМ; АИН – автономный инвертор напряжения; АД – асинхронный двигатель

В данной работе ставится задача исследовать чувствительность системы косвенного бездатчикового векторного управления к точности информации о активных сопротивлениях АД методом имитационного моделирования. Цель таких исследований заключается в том, чтобы установить степень повышения качества работы бездатчикового электропривода (ЭП): точности вычисления угловой скорости ротора и стабильности динамических свойств системы, при использовании алгоритмов параметрической идентификации АД в условиях возможных изменений его активных сопротивлений [5].

1. Модель системы косвенного бездатчикового векторного управления асинхронным двигателем

Структура ЭП с косвенным бездатчиковым векторным управлением, известная из литературных источников, например [2], на основании которой синтезирована имитационная модель (ИМ) в среде MATLAB, показана на рисунке 1.

Блок предварительной идентификации реализован программно в виде m-функции MATLAB согласно алгоритма, который представлен и подробно исследован в [3, 6].

Блоки ПФ и ПК выполняют фазные и координатные преобразования электрических переменных. При косвенном векторном управлении отсутствуют регуляторы тока, а обратная связь в ЭП осуществляется через электриче-

ский угол φ поворота вектора потокосцепления ротора. Этот электрический угол вычисляется по формуле [2, с. 238, формула (9.35)]

$$\varphi = \int_0^t (\omega_e + \Delta\omega_{e,z}) dt,$$

где ω_e – угловая электрическая скорость ротора; $\Delta\omega_{e,z}$ – заданное абсолютное электрическое скольжение.

В блоке ЗН определяются заданные значения напряжений u_x, u_y , соответствующие заданным значениям токов [2, с. 240, формула (9.47)]

$$\begin{cases} u_x = i_{sx,z}R_s + L_s (di_{sx,z}/dt) - \omega_1 L_\sigma i_{sy,z}, \\ u_y = i_{sy,z}R_s + L_\sigma (di_{sy,z}/dt) + \omega_1 L_s i_{sx,z}, \end{cases}$$

где $i_{sx,z}, i_{sy,z}$ – намагничивающая и моментная составляющие вектора тока статора.

Вычисление скорости выполняется согласно [2, с. 245, формула (9.66)]

$$\begin{aligned} \omega_e &= \omega_0 - \Delta\omega_{e,z} = \\ &= \omega_0 \frac{e_{r\alpha}^2 + e_{r\beta}^2}{e_{r\alpha}^2 + e_{r\alpha}^2 + k_r R_r (i_{s\alpha} e_{r\alpha} + i_{s\beta} e_{r\beta})}, \end{aligned}$$

где ω_0 – синхронная угловая частота вращения магнитного поля; $e_{r\alpha}, e_{r\beta}$ – составляющие ЭДС ротора

$$\begin{cases} e_{r\alpha} = 1/k_r (u_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_s - L_\sigma (di_{s\alpha}/dt)), \\ e_{r\beta} = 1/k_r (u_{s\beta} - i_{s\beta}R_s - L_\sigma (di_{s\beta}/dt)). \end{cases}$$

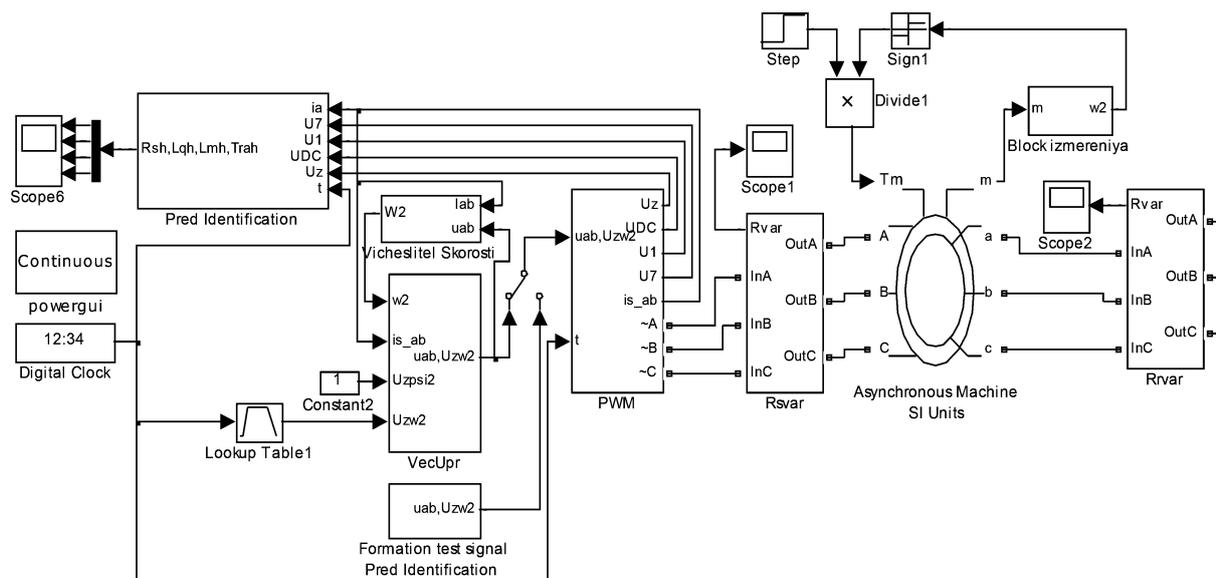


Рисунок 2. - ИМ системы косвенного бездатчикового векторного управления ЭП

В качестве регулятора скорости выбран ПИ-регулятор. В качестве малой некомпенсированной постоянной времени принята эквивалентная постоянная времени T_3 . При данных условиях ПИ-регулятор скорости имеет вид

$$W_{PC}(p) = A_{PC} + B_{PC}(p) = \frac{JR_3}{4T_3K_M} + \frac{1}{8T_3p},$$

где A_{PC} – пропорциональная составляющая регулятора; B_{PC} – интегральная составляющая регулятора; R_3 – эквивалентное сопротивление; T_3 – эквивалентная постоянная времени.

На рисунке 2 представлена ИМ рассматриваемой системы ЭП.

ИМ состоит из ряда отдельных подсистем: подсистемы «Formation test signal Pred Identification», формирующей тестовый сигнал в режиме предварительной параметрической идентификации АД; подсистемы «Pred Identification», включающей программное обеспечение предварительной параметрической идентификации АД; подсистемы «VecUpr», реализующей алгоритм косвенного бездатчикового векторного управления АД; подсистемы «PWM», которая формирует напряжение по принципу векторной ШИМ; подсистем «Rsvr» и «Rrvar», предназначенных для имитации переменных активных сопротивлений АД.

На ИМ переключение между режимом предварительной параметрической идентификации АД и режимом частотного векторного управления АД осуществляется по средством блока «Manual Switch».

2. Имитационное моделирование режимов работы системы бездатчикового векторного управления в условиях параметрических возмущений при выполнении параметрической идентификации АД и без нее

Имитационное моделирование выполнено для двигателей нескольких мощностей: АИР90L4 (2,2 кВт), АИР132М4 (11 кВт), АИР315S4 (160 кВт). Условия моделирования выбраны следующие: переменный шаг моделирования, метод интегрирования ode15s, длительность интервала дискретности цифрового управления $\Delta t = 10^{-5}$ с, частота ШИМ $f = 1$ кГц, напряжение звена постоянного тока $U_{dc} = 570$ В, момент нагрузки $M_c = 0,5M_n$.

Далее представлены результаты моделирования системы косвенного бездатчикового векторного управления для двигателя АИР90L4 (2,2 кВт).

Чувствительность системы косвенного бездатчикового векторного управления к изменениям активных сопротивлений двигателя исследовалась при выполнении параметрической идентификации АД и без нее. Начальные значения активных сопротивлений статора и ротора равны $R_{s, kat} \leftrightarrow 3,79$ Ом, $R_{r, kat} \leftrightarrow 2,78$ Ом.

На рисунке 3 представлены графики, характеризующие работу двигателя модели АИР90L4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления, при выполнении параметрической идентификации АД.

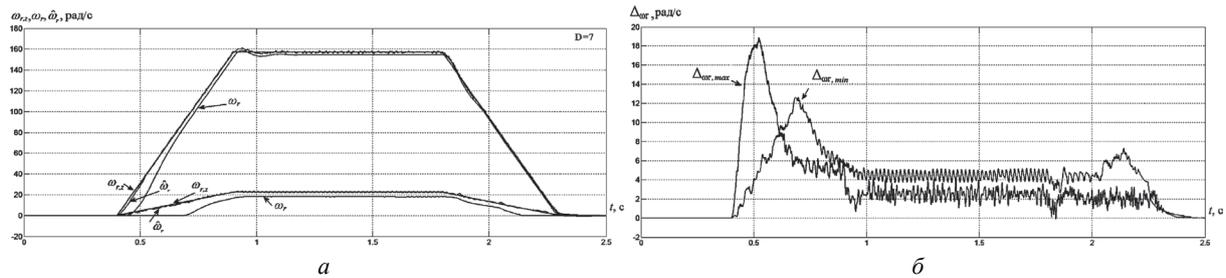


Рисунок 3. - Работа двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления при $f = 1$ кГц, $U_{dc} = 570$ В, $M_c = 0,5M_n$, значениях активных сопротивлений статора и ротора равных $1,5R_{s, kat}$, $1,5R_{r, kat}$ и выполнении параметрической идентификации АД: а – заданная, фактическая и вычисленная угловые скорости ротора вверх/вниз диапазона регулирования; б – абсолютная ошибка вычисления угловой скорости ротора

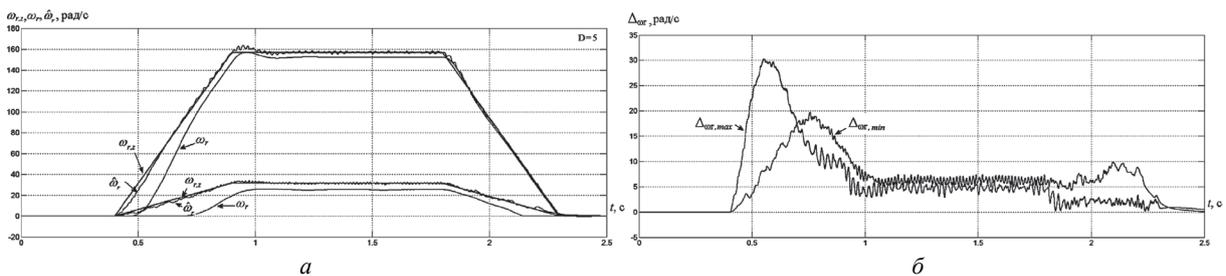


Рисунок 4. - Работа двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управления при $f = 1$ кГц, $U_{dc} = 570$ В, $M_c = 0,5M_n$, значениях активных сопротивлений статора и ротора равных $1,5R_{s, kat}$, $1,5R_{r, kat}$ без выполнения параметрической идентификации АД: а – заданная, фактическая и вычисленная угловые скорости ротора вверх/вниз диапазона регулирования; б – абсолютная ошибка вычисления угловой скорости ротора

На графиках отражены изменения заданного значения угловой скорости ротора $\omega_{r,z}$, вычисляемой в наблюдателе угловой скорости $\hat{\omega}_r$ и фактической скорости ω_r , а также абсолютной ошибки вычисления скорости $\Delta_{\omega r, max}$, $\Delta_{\omega r, min}$, соответствующие максимальной и минимальной скорости диапазона регулирования D . В процессе работы системы вычисляемая угловая скорость ротора $\hat{\omega}_r$ отличается от фактической ω_r , при этом стремится к заданному значению $\omega_{r,z}$. Кривые изменения скорости представлены для случая задания максимальной и минимальной скорости диапазона регулирования, который в рассматриваемом случае составил $D = 7$.

На рисунке 4 представлены графики для случая, когда частотный привод работает в условиях изменения активных сопротивлений статора и ротора без выполнения параметрической идентификации АД.

Анализ результатов имитационного моделирования позволяют сделать некоторые выводы. Так выполнение параметрической идентификации АД, при которой определяются, по крайней мере, активные сопротивления статора и ротора двигателя АИР90Л4 в системе косвенного бездатчикового векторного управле-

ния, по сравнению со случаем, когда идентификатор отсутствует, обеспечивает:

- снижение средней статической погрешности вычисления угловой скорости ротора для максимальной скорости диапазона регулирования в 2 раза;
- снижение средней статической погрешности вычисления угловой скорости ротора для минимальной скорости диапазона регулирования в 1,3 раза;
- снижение максимальной динамической погрешности вычисления угловой скорости ротора в 1,6 раз;
- сохранение диапазона регулирования скорости $D = 7$ (если идентификация АД не выполняется диапазон снижается в 1,4 раза, $D = 5$).

Результаты моделирования системы косвенного бездатчикового векторного управления двигателями АИР132М4 и АИР315S4 при выполнении параметрической идентификации и без нее, также подтверждают тот факт, что выполнение параметрической идентификации АД обеспечивает снижение средней статической и максимальной динамической погрешностей вычисления скорости от 1,2 до 2 раз при сохранении диапазона регулирования.

Выводы

1. Определение активных сопротивлений статора и ротора АД позволяет сохранить динамические свойства системы косвенного бездатчикового векторного управления в заданном диапазоне регулирования угловой скорости. Это позволяет успешно применять данные системы ЭП для решения различных технологических задач.

2. Точность вычисления угловой скорости ротора при изменениях активных сопротивлений АД в широких пределах удается повысить в 1,2–2 раза за счет использования алгоритмов параметрической идентификации АД и настройки параметров наблюдающего устройства и регуляторов соответственно значениям изменяющихся параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Опейко, О. Ф.** Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления / О. Ф. Опейко, А. И. Пташник, В. И. Хильмон // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2010. – № 6. – С. 37–43.
2. **Фираго, Б. И.** Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.
3. **Однолько, Д. С.** Алгоритм параметрической идентификации асинхронного двигателя и его экспериментальное тестирование / Д. С. Однолько // Вестник Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского. – 2013. – № 4. – С. 9–14.
4. **Опейко, О. Ф.** Микропроцессорные средства в автоматизированном электроприводе: учеб. пособие / О. Ф. Опейко, Ю. Н. Петренко. – Минск: Амалфея, 2008. – 340 с.
5. **Однолько, Д. С.** Параметрическая идентификация асинхронного двигателя в составе частотно-регулируемого электропривода при неподвижном роторе / Д. С. Однолько // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2014. – № 2. – С. 64–72.

Поступила 10.03.15

Odnolko D. S.

MATHEMATICAL SIMULATION OF SENSORLESS VECTOR CONTROL INDUCTION MOTOR UNDER PARAMETRIC PERTURBATIONS

Developed a mathematical simulation model of the system of indirect sensorless vector control induction motor. The studies of the sensitivity of the electric drive system to parametric perturbations, in particular to the change in resistance of the stator and rotor. Presents an analysis of quality of work the system: estimation accuracy of the angular velocity of the rotor and the stability of the dynamic properties of the system, using the algorithms of parametric identification of an induction motor and without them.

УДК 629.7.05

ЕРОМИН А. М., ШАБАН С. А., ПОДКОПАЕВ П. А.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ КОНТУРА ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО КРИТЕРИЮ ОБОБЩЕННОЙ РАБОТЫ

Военная академия Республики Беларусь

В статье рассматривается решение задачи нетерминального управления для нейтрального контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата (ТБЛА). Синтез оптимального управления осуществляется на основе минимизации функционала обобщенной работы. Проводится анализ оптимального контура ТБЛА.

Введение

Из [1] известно, что к задачам терминального управления относятся задачи, в которых критерием качества управления является точность приведения объекта в желаемое состояние в определенный конечный момент времени. Этот момент или назначен заранее или приближение к нему может контролироваться в процессе управления, т. е. известно текущее относительное время. В работах [2–5], рассмотрен ряд задач стабилизации и управления в режиме наведения ТБЛА на цель. В этих исследованиях оптимальные управления синтезируются на основе минимизации функционала качества с фиксированным временем наведения. Однако, задачи с фиксированным временем для задач управления в режиме наведения ТБЛА на цель не является корректной, так как это время при неизвестном поведении движущейся цели можно определить только приблизительно. Решения при этом получаются довольно сложными, что обусловлено интегрированием нелинейного уравнения в частных производных или громоздких систем нелинейных дифференциальных уравнений. Кроме того, качество процессов терминального управления не всегда получается удовлетворительным. Последнее объясняется тем, что процесс перевода в конечное состояние не имеет достаточного отражения в минимизируемом функционале, а введение граничных условий не до конца обосновано.

В данной статье при синтезе контура ТБЛА ставится нетерминальная задача, т. е.

необходимо оптимизировать переходные процессы вне зависимости от момента их возбуждения и минимизировать ошибки наведения не в заданный, а в произвольный момент времени. Рассматривается синтез нейтрального стационарного линейного контура ТБЛА на основе минимизации функционала обобщенной работы. Достоинство такого подхода заключается в том, что коэффициенты вектора оптимального управления определяются путем решения линейных уравнений. Это позволяет обнаружить общие закономерности оптимальных управлений и осуществлять целенаправленную корректировку минимизируемого функционала.

Постановка задачи

Структурная схема разомкнутого контура ТБЛА, с учетом модели задающего воздействия, состоит из последовательного соединения апериодического звена с постоянной времени T и двух интегрирующих звеньев. Динамические свойства устройства передачи команд и системы стабилизации ТБЛА считаются безинерционными. Передаточные функции измерительных устройств цели и ТБЛА представляются единичными за счет добавления ошибки сопровождения к оценке угловой координаты, как это показано в [6]. В качестве управления принимается действующее на ТБЛА нормальное ускорение. Для системы выполняется условие полной степени наблюдаемости, которое в данном случае заключается в том, что выходные величины x_1, x_2, x_3

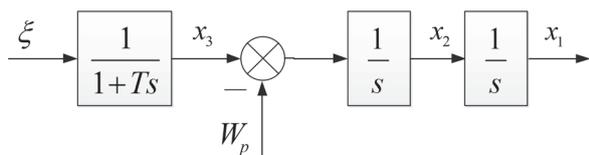


Рис. 1. Структурная схема разомкнутого контура ТБЛА

всех звеньев поддаются контролю (наблюдению) и могут быть использованы для управления. В отношении степени управляемости будем полагать, что она неполная, т. е. управление вводится только на второй точке (выходе апериодического звена) системы, а остальные точки недоступны для непосредственного ввода управляющих воздействий.

Систему уравнений для фазовых переменных с учетом модели задающего воздействия запишем в виде [2]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), & x_1(t_0) = x_{10}; \\ \dot{x}_2(t) = x_3(t) - W_p(t), & x_2(t_0) = x_{20}; \\ \dot{x}_3(t) = -\frac{1}{T}x_3(t) + \frac{1}{T}\xi(t), & x_3(t_0) = x_{30}. \end{cases} \quad (1)$$

где $x_1(t)$ – ошибка наведения ТБЛА; $W_p(t)$ – нормальное ускорения ТБЛА; $x_3(t) = W_k(t)$ – требуемое ускорения ТБЛА.

В векторно-матричной форме (1) примет вид:

$$\dot{\mathbf{X}}(\hat{t}) = \mathbf{F}\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}\mathbf{U}(t) + \mathbf{J} \zeta(t), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0, \quad (2)$$

где \mathbf{F} – динамическая матрица состояния размерности (3×3) ; \mathbf{G} – матрица эффективности управления размерности (3×3) ; \mathbf{U} – вектор сигналов управления; \mathbf{J} – матрица, учитывающая влияние дополнительных (неконтролируемых) случайных возмущений на фильтруемый процесс (3×3) ; $\hat{t}(t)$ – вектор дополнительных случайных возмущений, который описывается белым гауссовским шумом с нулевым математическим ожиданием и матрицей односторонних спектральных плотностей Q .

Данную разомкнутую следящую систему можно рассматривать как нейтральный объект (число нулевых корней характеристического уравнения здесь равно 2). Как известно из [1], применимость решения задач нетерминального управления по методу А. А. Красовского существенно зависит от устойчивости исходного объекта. Для обеспечения применимости метода А. А. Красовского произведем преобразование фазовых координат контура ТБЛА.

Ввиду наличия двух интегрирующих звеньев весовые функции контура имеют различные степени расходимости, а именно

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \begin{pmatrix} 1 & t & T \left(t - T \left(1 - T e^{-\frac{t}{T}} \right) \right) \\ 0 & 1 & T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \\ 0 & 0 & e^{-\frac{t}{T}} \end{pmatrix}.$$

Вследствие этого осуществим преобразование координат с различными коэффициентами пропорциональности. Введем фазовые переменные x_i^* , пропорциональные исходным x_i , по формуле [1]

$$x_i(t) = \chi_i(t) x_i^*(t), \quad (i=1, \dots, 3), \quad (3)$$

где скалярные функции $\chi_i(t) > 0$ и достаточно быстро монотонно возрастают. Функции $\chi_i(t)$ выбираем в виде [1]

$$\chi_i(t) = e^{\lambda_i(t-t_0)}, \quad (i=1, \dots, 3),$$

где λ_i – положительные действительные числа. Произведя такую замену переменных в уравнении (2), получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}^*(t) &= -\chi^{-1}(t) \dot{\chi}(t) \mathbf{X}^*(t) + \\ &+ \chi^{-1}(t) \mathbf{F} \chi'(t) \mathbf{X}^*(t) + \chi^{-1}(t) \mathbf{G} \mathbf{U}(t) + \\ &+ \chi^{-1}(t) \mathbf{J} \zeta(t), \\ \mathbf{X}^*(t_0) &= \mathbf{X}_0^*, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{где } \chi'(t) = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1(t-t_0)} & 0 & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2(t-t_0)} & 0 \\ 0 & 0 & e^{\lambda_3(t-t_0)} \end{pmatrix}$$

При любой заданной интенсивности нарастания координат x_i , координаты x_i^* будут убывать и стремиться к нулю при достаточно быстром возрастании функции $\chi_i(t)$. Следовательно, невозмущенное состояние объекта (4) при достаточно быстро нарастающей функции $\chi_i(t)$ в новых координатах устойчиво [1].

Вектор состояния в начальный момент времени $\mathbf{X}^*(t_0)$ – гауссовский случайный вектор с характеристиками:

$$M[\mathbf{X}^*(t_0)] = 0, \quad M[\mathbf{X}^*(t_0)\mathbf{X}^{*\top}(t_0)] = \mathbf{P}_0.$$

где \mathbf{P}_0 – матрица априорных дисперсий фазовых координат наблюдаемой системы; M – операция математического ожидания

Будем считать, что измеряется ошибка наведения ТБЛА $x_1(t)$, а уравнение измерителя имеет вид:

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}\eta(t), \quad (5)$$

где \mathbf{C} и \mathbf{N} заданные матрицы размерности (3×3) .

Шум наблюдения $\eta(t)$ будем считать гауссовским процессом типа белого шума, с нулевым математическим ожиданием и матрицей односторонних спектральных плотностей R .

Корреляционные матрицы некоррелированных белых шумов $\xi(t)$ и $\eta(t)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} M[\xi(t)\xi^\top(t')] &= Q(t)\delta(t-t'); \\ M[\eta(t)\eta^\top(t')] &= R(t)\delta(t-t'), \end{aligned} \quad (6)$$

Задача состоит в определении вектора управления $\mathbf{U}(t)$, минимизирующего на произвольном интервале (t_0, t_k) математическое ожидание функционала

$$\begin{aligned} I(\mathbf{U}(t)) &= \frac{1}{2} M \left\{ \mathbf{X}^{*\top}(t_k) \mathbf{S} \mathbf{X}^*(t_k) + \right. \\ &+ \int_{t_0}^{t_k} \left(\dot{\mathbf{X}}^{*\top}(t) \mathbf{A} \mathbf{X}^*(t) + \mathbf{U}^\top(t) k^{-1} \mathbf{U}(t) + \right. \\ &\left. \left. + \mathbf{U}_{\text{опт}}^\top(t) k^{-1} \mathbf{U}_{\text{опт}}(t) \right) dt \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

где первое слагаемое представляет собой вынужденное (не зависящее от граничных условий) решение уравнения

$$\mathbf{F}^\top \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{F} = -\mathbf{A}. \quad (8)$$

Первое слагаемое под интегралом в (7) определяет качество регулирования в контуре ТБЛА, а выбором матрицы штрафов \mathbf{A} , в виде

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

определяются требование к ошибке наведения и демпфированию в контуре управления (выбором коэффициентов штрафа a_{11} и a_{22} , соответственно). Второе слагаемое под интегралом в (7) характеризует суммарные энергетические затраты на управление, совершаемое управляющим воздействием за рассматриваемый

интервал времени. Требуемое ограничение на минимальный расход нормального ускорения ТБЛА $W_p(t)$, которое не учтено в постановке задачи, обеспечивается выбором коэффициента штрафа на управление k . Третье слагаемое под интегралом в (7) является взвешенной суммой работ сигналов управления на входах исполнительных устройств в оптимальной системе, которое аддитивно содержит значение функции \mathbf{S} на конце рассматриваемого интервала времени.

Синтез оптимального контура управления

Определение вектора оптимального управления. Оптимальное управление, минимизирующее на произвольном интервале (t_0, t_k) математическое ожидание функционала (7), определяется в виде [1, 7]

$$\mathbf{U}(t) = -\chi^{i-2}(t) k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}(t), \quad (9)$$

где \mathbf{S} – матрица коэффициентов оптимального управления.

Коэффициент k' определяется выражением

$$k' = \chi^{i-2}(t) k,$$

где умножение на $\chi^{i-2}(t)$ необходимо для получения стационарного оптимального управления.

Вектор оптимального управления (9) с учетом замены переменных в (2) примет вид

$$\mathbf{U}(t) = -\chi^i(t) k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}^*(t).$$

Учитывая, что переменная $\hat{\mathbf{X}}^*(t)$ связана с переменной $\hat{\mathbf{X}}(t)$ формулой (3), вектор оптимального управления примет вид

$$\mathbf{U}(t) = -k' \mathbf{G}^\top \mathbf{S} \hat{\mathbf{X}}(t), \quad (10)$$

Для получения нетерминальных управлений (10), коэффициенты которых зависят лишь от абсолютного времени t , необходимо найти вынужденное решение уравнения (8), не зависящее от граничного условия.

Так как контур ТБЛА стационарен, а матрица \mathbf{A} выбрана постоянной, то решение уравнения (8) может быть получено из матричного уравнения [1, 7]

$$(\mathbf{F}^\top - \lambda^*) \mathbf{S} + \mathbf{S} (\mathbf{F} - \lambda^*) = -\mathbf{A}, \quad (11)$$

$$\text{где } \lambda^* = \begin{vmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{vmatrix}.$$

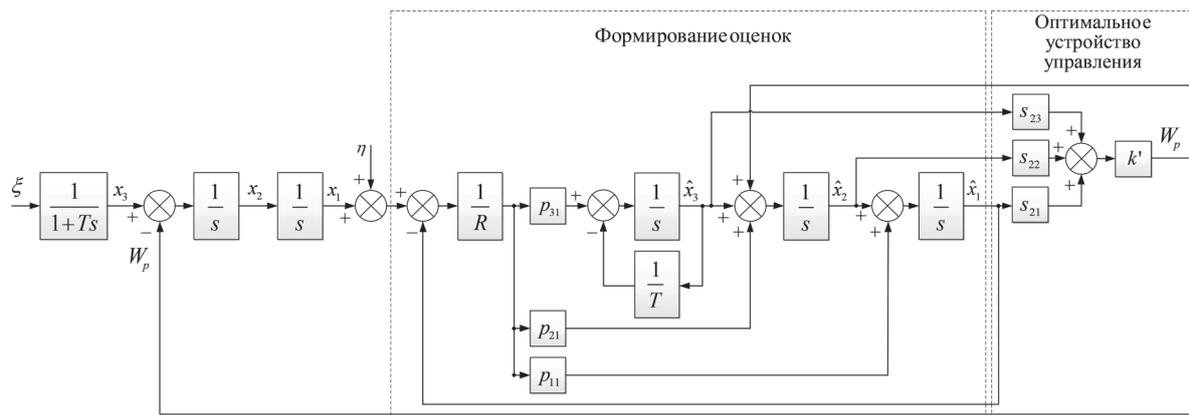


Рис. 2. Структурная схема оптимального контура ТБЛА

Матричное уравнение (11), учитывая симметричность матрицы S , запишется покомпонентно в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_{11} - 2\lambda_1 s_{11} = 0; \\ s_{11} - (\lambda_1 + \lambda_2) s_{12} = 0; \\ s_{12} - (\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T) s_{13} = 0; \\ 2s_{12} - 2\lambda_2 s_{22} + a_{22} = 0; \\ s_{13} + s_{22} - (\lambda_2 + \lambda_3 + 1/T) s_{23} = 0; \\ s_{23} - (\lambda_3 + 1/T) s_{33} = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Коэффициенты матрицы s , входящие в вектор оптимального управления (10), с учетом (12) будут равны:

$$\begin{aligned} s_{12} &= \frac{a_{11}}{2\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ s_{22} &= \frac{a_{11} + a_{22}\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)}{2\lambda_1\lambda_2(\lambda_1 + \lambda_2)}; \\ s_{23} &= (a_{11}(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 1/T) + \\ &+ a_{22}\lambda_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T)) / (2\lambda_1\lambda_2 \times \\ &\times (\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_3 + 1/T)(\lambda_2 + \lambda_3 + 1/T)). \end{aligned} \quad (13)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты λ_i должны быть больше характеристического числа объекта (4) и в процессе синтеза выбираются таким образом, чтобы обеспечивались желаемые свойства последнего члена в функционале (7).

Определение вектора оценки $\hat{X}(t)$. Для определения вектора оценки $\hat{X}(t)$ воспользуемся уравнением линейного фильтра Калмана [1, 3, 7]

$$\dot{\hat{X}}(t) = F\hat{X}(t) + GU(t) + B(t)(Z(t) - C\hat{X}(t)), \quad (14)$$

где $B(t)$ – матрица оптимальных коэффициентов фильтрации, которая определяется соотношением

$$B(t) = P(t)C^T(NRN^T)^{-1}, \quad (15)$$

здесь $P(t)$ – матрица ошибок оценивания вектора состояния, которая определяется решением уравнений Риккати:

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= FP(t) + P(t)F^T - \\ &- P(t)C^T(NRN^T)^{-1}CP(t) + JQJ^T, \quad (16) \\ P(t_0) &= P_0. \end{aligned}$$

Представив матричное уравнение (16) в виде системы алгебраических уравнений, определяющих установившиеся значения p_{11}, p_{21}, p_{31} , и решив их, получим:

$$\begin{aligned} p_{11} &\approx 2R \sqrt{\frac{Q}{RT^2}} - \frac{R}{T}, \\ p_{21} &= \frac{1}{2R} p_{11}^2, \\ p_{31} &= \sqrt{\frac{QR}{T^2}} - \frac{p_{21}}{T}. \end{aligned} \quad (17)$$

Структурная схема контура ТБЛА, соответствующая (10), приведена на рисунке 2.

Определение передаточной функции контура управления. Определив в уравнениях (10) и (14) произведения матриц и перейдя к изображениям по Лапласу при нулевых начальных условиях, получим систему уравнений описывающих контур управления ТБЛА в установившемся режиме:

$$\begin{cases} W_p(s) - k's_{21}\hat{x}_1(s) - k's_{22}\hat{x}_2(s) - k's_{23}\hat{x}_3(s) = 0; \\ \left(s + \frac{P_{11}}{R}\right)\hat{x}_1(s) - \hat{x}_2(s) = \frac{P_{11}}{R}x_1(s); \\ W_p(s) + \frac{P_{21}}{R}\hat{x}_1(s) + s\hat{x}_2(s) - \hat{x}_3(s) = \frac{P_{21}}{R}x_1(s); \\ \frac{P_{31}}{R}\hat{x}_1(s) + \left(s + \frac{1}{T}\right)\hat{x}_3(s) = \frac{P_{31}}{R}x_1(s). \end{cases} \quad (18)$$

Решив систему уравнений (18) получим передаточную функцию контура управления ТБЛА:

$$W(s) = \frac{k_w(1+sT_1)(1+sT_2)}{s^2(1+sT_3)(1+2\xi_2T_4s+T_4^2s^2)}. \quad (19)$$

Определение параметров передаточной функции (19) не представляет особых затруднений, однако, получающиеся выражения громоздки и поэтому здесь не приводятся.

Выбор коэффициентов штрафа функционала качества

Выбор коэффициентов штрафа функционала качества осуществляется эмпирическим способом, описанным в [8, 9]. Считается, что максимально допустимые отклонения фазовых координат в любой момент времени вносятся в функционал качества одинаковый вклад и приблизительно равняется вкладу максимально допустимого отклонения сигнала управления. Исходя из этих предположений, получим

$$a_{22} = \left(\frac{x_{1\max}}{x_{2\max}}\right)^2 a_{11};$$

$$a_{11}x_{1\max}^2 + a_{22}x_{2\max}^2 = kW_{p\max}^2.$$

Полученные по этим формулам значения коэффициентов штрафа рассматриваются как начальные оценки. Окончательный выбор коэффициентов штрафа производится после нескольких пробных расчетов обратных связей и последующего моделирования контура управления.

Данный подход позволяет найти аналитические зависимости между элементами матрицы S , а следовательно, динамическими свойствами контура управления (запасами устойчивости, колебательностью, временем переходного процесса и т. д.), и коэффициентами штрафа функционала качества.

При проведении анализа зависимости параметров контура телеуправления от коэффициентов штрафа функционала качества значение a_{11} выбирается таким образом, чтобы отклонения по всем координатам достигали своего максимума одновременно. Коэффициенты оптимального управления (10) вычисляются по формулам (13), (17) при следующих значениях параметров:

$$Q = 66020 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-3}, \quad T = 7 \text{ с},$$

$$R = 10,075 \text{ м}^2 \cdot \text{с}, \quad r_b = 10500 \text{ м},$$

$$\lambda_1 = 1,6, \quad \lambda_2 = 1,8, \quad \lambda_3 = 6,85.$$

где r_b – дальность до точки встречи.

В результате проведенного анализа выбраны следующие значения коэффициентов штрафа функционала качества (7):

$$a_{11} = 0,5, \quad a_{22} = 0,756 \text{ с}^2, \quad k = 0,035 \text{ с}^4.$$

Передаточная функция оптимального контура телеуправляемого БЛА имеет вид:

$$W(s) = \frac{2,076(1+1,038s)}{s^2(1+2 \cdot 0,908 \cdot 0,159s+0,159^2s^2)}.$$

Необходимо отметить, что от выбора коэффициентов штрафа a_{11} , a_{22} зависит качество регулирования контура управления. Так, например, положив $a_{22} = 0$, мы отказываемся от дополнительных требований к демпфированию контура управления. А положив $a_{11} = 0$, $a_{22} = 0$, мы исключаем требования к качеству регулирования, и оптимальное управление будет определяться только суммарными энергетическими затратами на управление.

Результаты сравнительного анализа математических моделей

Для проведения анализа оптимального контура ТБЛА разработана имитационная модель в среде визуального моделирования MATLAB (SIMULINK). Данная модель включает в себя: блоки задающего и возмущающего воздействий; блок устройства выработки команд управления (УВК).

Блок задающего воздействия. Процесс движения маневрирующей цели описывается гауссовским случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и известной корреляционной функцией [10]:

$$R(\tau) = De^{-\frac{|\tau|}{T}}, \quad (20)$$

где постоянная времени маневрирования цели T и дисперсия маневрирования цели D выбираются в соответствии с типом цели [10].

Случайный процесс с корреляционной функцией типа (20) формируется блоком Band-Limited White Noise с параметрами: мощность шума – $Q = 2DT$; такт дискретности – 0,01.

Блок возмущающего воздействия. Шум наблюдения $\eta(t)$ формируется блоком Band-Limited White Noise с параметрами: мощность шума – R ; такт дискретности – 0,01. Мощность шума определяется соотношением [2]:

$$R = 2r_b^2 \sigma_\varepsilon^2 T_{\text{ш}},$$

где σ_ε – среднее квадратическое отклонение ошибок измерения угловых координат;

$T_{\text{ш}}$ – интервал корреляции ошибок измерения угловых координат.

Блок УВК. Передаточная функция УВК рассчитывается аналитически, в ходе синтеза контура управления, и имеет вид:

$$W_{\text{увк}}(s) = \frac{2,076(1 + 1,038s)}{1 + 2 \cdot 0,908 \cdot 0,159s + 0,159^2 s^2}.$$

Анализ оптимального контура ТБЛА. Устойчивость контура управления определялась по логарифмическому критерию. Запас устойчивости контура управления по фазе $\Delta\varphi(\omega_c) = 30,6$ град, а по амплитуде $\Delta L = 16,6$ Дб.

За показатель точности выбрана дисперсия ошибки наведения ТБЛА, расчет которой производится по формуле [8]

$$D_{hi} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \left(\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (x_{ij}(k) - x_{yj}(k))^2 \right),$$

где N – количество шагов в процессе моделирования одной реализации; J – количество ре-

ализаций; $x_{ij}(k) - x_{yj}(k)$ – разность требуемой и фактической ошибок наведения ТБЛА.

В ходе моделирования проведено 1300 опытов. Значение СКО ошибки наведения ТБЛА $\sigma_h = \sqrt{D_h} = 14,685$ м.

В таблице представлены значения СКО ошибки наведения при различных значениях спектральной плотности задающего воздействия Q . Расчет спектральной плотности Q проводился в зависимости от типа цели при совершении маневра с максимальной перегрузкой g_{max} . Из таблицы видно что, для целей с допустимой перегрузкой до $7g$ м/с² ($Q = 66020$, м²·с⁻³), СКО ошибки наведения не превышает 15 м.

Зависимость значения СКО ошибки наведения от спектральной плотности задающего воздействия

Показатель	Значения					
Q , м ² ·с ⁻³	2277	5389	12130	33680	66020	86230
g_{max} , м/с ²	1,3g	2g	3g	5g	7g	8g
σ_h , м	5,08	7,59	10,38	13,9	14,685	22,8

Заключение

В статье рассмотрен один из подходов к решению задачи нетерминального управления для нейтрального контура ТБЛА. Использование функционала обобщенной работы упростило процесс определения оптимального управления контура ТБЛА и позволило преодолеть трудности, которые возникали в работах [2, 4, 6] при решении систем нелинейных дифференциальных уравнений. Линейность уравнения (8) позволяет обнаружить общие закономерности оптимального управления и осуществлять целенаправленную корректировку функционала (7) выбором коэффициентов штрафа. Анализ оптимального контура ТБЛА показал, что при совершении маневра целью с максимальной перегрузкой до $7g$ м/с² обеспечивается работоспособность контура, а ошибки наведения не превышают допустимых значений.

Литература

1. Красовский, А. А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование / А. А. Красовский – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973. – 560 с.
2. Кун, А. А. Синтез квазиоптимального контура телеуправляемой ракеты / А. А. Кун [и др.] // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 26. – С. 95–102.
3. Кун, А. А. Основы построения систем автоматического управления: в 3 ч. / А. А. Кун, В. Ф. Лукьянов, С. А. Шабан; под ред. А. А. Куна. – Минск: Изд. акад., 2001. – 3 ч.
4. Орлов, Е. В. Проектирование систем телеуправления / Е. В. Орлов. – Ижевск: Удмурт. ун-т., 2000. – 272 с.
5. Батков, А. М. Системы телеуправления / А. М. Батков, И. Б. Тарханов. – М.: Машиностроение, 1971. – 192 с.
6. Кун, А. А. Синтез квазиоптимального контура телеуправляемого беспилотного летательного аппарата при инерционном измерителе / А. А. Кун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2014. – № 8(86). – С. 65–71.

7. Казаков, И. Е. Методы оптимизации стохастических систем / И. Е. Казаков, Д. И. Гладков. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
8. Меркулов, В. И. Авиационные системы радиоуправления: в 3 т / В. И. Меркулов [и др.] под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2003. – 3 т.
9. Крутько, П. Д. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем / П. Д. Крутько, А. И. Максимов, Л. М. Скворцов. – М.: Радио и связь, 1988. – 306 с.
10. Горшков, С. А. Сопоставление методов адаптивной дискретной фильтрации координат маневрирующих целей / С. А. Горшков, А. С. Солонар // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 6, т.4. – С. 14–30.

Поступила 8.7.2015

EROMIN A., SHABAN S., PODKOPAEV P.

ANALYTICAL ENGINEERING OF A TELECONTROLLED PILOTLESS AIRCRAFT CONTOUR IN ACCORDANCE WITH GENERALIZED WORK CRITERION

The article considers the non-terminal problem for neutral contour of a telecontrolled pilotless aircraft. Optimal control synthesis is provided on the basis of minimization of generalized work functional. The analysis of optimal telecontrolled pilotless aircraft contour is carried out.

ТАТУР М. М.

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ПЛАТФОРМЕ СЕРИЙНОГО МИНИ-ТРАКТОРА «БЕЛАРУС 132»

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники ООО
«Интеллектуальные процессоры»*

Анонсируется инновационный проект по созданию опытного образца многофункционального робототехнического комплекса. Отличительная особенность проекта – максимально использование комплектующих и программного обеспечения отечественного производства. В мобильном роботе применена концепция многоуровневой системы управления, согласно которой основная вычислительная нагрузка ложится на бортовой компьютер. Это позволит сократить объемы передаваемых данных по беспроводной линии связи и повысить оперативность разработки алгоритмов управления верхнего уровня.

Введение

Робототехнический мобильный комплекс – это машина, которая может перемещаться в пространстве и выполнять определенные функции, обусловленные ее специализацией. Разработка и построение мобильных робототехнических комплексов развивается в двух направлениях: первое основано на создании уникальных (механизированных) платформ, второе – на применении серийных шасси или изделий в целом. Примерами робототехнических комплексов на специализированных шасси могут служить: изделие «Адунок» [1] военного назначения (Беларусь), многофункциональные роботы для силовых служб QinetiQ (Великобритания) [2], мобильный робот для тушения пожаров (Россия) [3]. Большинство автоконцернов создают свои роботизированные концепткарры, которые без водителя могут ездить по дорогам и даже «соблюдать» правила дорожного движения. Как правило, такие машины-роботы создаются для апробации новых технологий, а отдельные опции затем внедряются в серийные автомобили. Так, в повседневную жизнь уже вошли автоматическая трансмиссия, круиз-контроль, направление движения, старт-стоп двигателя, парктроник, распознавание дорожных знаков, предотвращение лобового столкновения с препятствием и др., которые являются составными функциями комплексной системы управле-

ния мобильного робота. Однако, отечественных мобильных робототехнических комплексов серийного или мелкосерийного производства, доступных для массового применения в сельском, коммунальном хозяйствах и/или силовых ведомствах, пока нет. В настоящей работе анонсируется проект создания отечественного мобильного робота на базе шасси серийного отечественного мини-трактора и излагается концепция управления таким роботом.

Робототехнический комплекс на базе шасси отечественного мини-трактора

В 2013 году консорциум Белорусских компаний и организаций, в том числе: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций МЧС; ОАО «НИИ ЭВМ»; НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО; РУП Сморгонский агрегатный завод»; Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» и ООО «Интеллектуальные процессоры» (координатор), выступили с инновационным проектом создания отечественного производства робототехнических мобильных комплексов на базе серийных сельскохозяйственных машин. Инициатива была поддержана Инновационным фондом Минского городского исполнительного комитета, а про-

ект включен в Государственную программу инновационного развития республики Беларусь на период 2011–2015 г. г. [4].

Создаваемое изделие позиционируется как многофункциональный робототехнический комплекс для использования в условиях, связанных с риском для здоровья и жизни водителя и обслуживающего персонала: в чрезвычайных ситуациях – при ликвидации угроз взрывов, отравлений, при тушении пожаров; в земледелии – при опрыскивании полей ядохимикатами и др. Специфика целевого использования робототехнического комплекса будет определяться устанавливаемым специальным навесным оборудованием и соответствующим программным обеспечением.

Особенность проекта состоит в максимальном использовании комплектующих и программного обеспечения отечественного производства, что позволит сократить себестоимость конечной продукции. В качестве мобильной платформы было выбрано шасси мини-трактора «Беларус-132» производства РУП «Сморгонский агрегатный завод» (рис. 1).

Шасси комплектуется бензиновым двигателем (HONDA GX390). Мощность и тяговое усилие, изначально рассчитанные на вспахивание почвы, вполне достаточны, чтобы обеспечить перемещение грузовой тележки весом до 500 кг или расчистки завалов с применением штатного навесного оборудования. 3D-модель робототехнического комплекса приведена на рис. 1.

В состав комплекса, помимо серийного шасси, входят следующие системы и агрегаты: видеосистема для обеспечения вождения; мехатронная система управления движением; бортовой компьютер; система телекоммуникации с выносным пультом управления; штатное навесное оборудование (например, отвал); специальное навесное оборудование (напри-



Рисунок 1. - Общий вид робототехнического комплекса на базе шасси «Беларус 132»

мер, на экспериментальном образце робототехнического комплекса установлен радиоуправляемый ствол для пожаротушения от компании «Импреса»).

Шарнирно-сочлененная рама шасси мини-трактора «Беларус -132Н» обеспечивает исключительную маневренность робота с наименьшим радиусом поворота – 2,5 метра, что может стать ключевым фактором при применении комплекса в условиях переполненных транспортом городских улиц, в лесу, в тоннелях и даже в больших помещениях. В отличие от серийного изделия, в робототехническом комплексе изменено основное направление движения, т. е. мобильный робот будет двигаться «задом-на-перед». При этом двигательная часть будет находиться в более защищенной зоне, не будет мешать обзору видеосистемы и работе специального навесного оборудования.

Вес робототехнического комплекса составляет около 400 кг при габаритах 120×120×180 см. Массогабаритные характеристики позволяют транспортировать его в грузовом микроавтобусе со средней колесной базой либо на обычном одноосном прицепе, производства Сморгонского агрегатного завода.

Концепция системы управления мобильным роботом

При разработке концепции управления мобильным роботом необходимо решить ряд принципиальных вопросов, в том числе: определить стратегию (основные способы) позиционирования и навигации мобильного робота; внести ограничения и детализировать режимы управления, в особенности, полуавтоматическое и/или автоматическое; определить перечень основных алгоритмов и связать с режимами управления; распределить реализацию алгоритмов по вычислительным модулям.

1. Позиционирование мобильного робота в пространстве это – получение информации о его координатах в текущий момент времени относительно некоторой системы отсчета. Позиционирование необходимо как для оператора и так и «самого» робота, чтобы вырабатывать команды на дальнейшие действия. Позиционирование может осуществляться как в абсолютных координатах (например, с привязкой к географическим картам, в том числе цифровым картам ГИС) или относительно не-

которой заданной точки в пространстве (или на местности).

Под навигацией будем понимать в простейшем случае – выбор направления движения, а в более сложных вариантах – прокладывание маршрута, определение скорости прохождения отдельных участков и т. п. Направление – это горизонтальный угол, измеряемый по часовой стрелке от 0 до 360 градусов, между начальным направлением (обычно на северный или магнитный полюс) и некоторой заданной прямой.

Для позиционирования и навигации мобильных роботов обычно применяют следующие источники информации, в различных сочетаниях: видеосистемы; эхолокационные датчики; радиолокационные датчики; компасы различных видов; акселерометры; глобальную систему позиционирования (GPS).

В анонсируемом проекте на начальном этапе применяется минимальная комплектация источников информации о внешней среде, т. е. только видеосистема для обеспечения вождения. Она представляет собой стереопару аналоговых камер с фиксированным фокусным расстоянием, что позволит алгоритмически вычислить приблизительное расстояние до объектов, расположенных в центральной части поля зрения. Также, предусмотрена дополнительная камера, размещаемая на поворотной платформе (в нашем случае – на лафетном стволе). Очевидно, что в данном варианте комплектации источников информации позиционирование возможно относительно некоторой заданной точки, например, точки начала движения, а также видимых ориентиров. Таким образом, элементами позиционирования и навигации (для данного проекта) являются:

- начало движения – из центра полярной системы координат;
- движение осуществляется по прямой с постоянной скоростью до заданной точки, в которой возможен поворот, разворот с указанием нового ориентира;
- в ходе движения вычисляются координаты: дальность от точки начала движения, дальность до ориентира, дальность до радиуса действия.
- текущие относительные координаты и др. параметры движения выводятся на монитор оператора.

Для более сложных вариантов позиционирования и навигации необходимо применять дополнительные источники информации (электронный компас, GPS, систему углового слежения-пеленгатор, внешнюю по отношению к роботу видеосистему и др.). По мере развития проекта, мобильный робот опционально будет оснащаться глобальной и инерциальными системами позиционирования и навигации.

2. В техническом задании на разработку робототехнического комплекса заложены следующие режимы вождения:

- дистанционное управление (оператором) по радиоканалу на расстоянии до 500 метров и проводному (технологическому) каналу – до 10 метров;
- полуавтономное управление с навигацией посредством бортовой видеосистемы.

Дистанционное управление оператором осуществляется посредством внешнего компьютера (ноутбука) и пульта управления. Ноутбук в основном предназначен для отображения видеоданных с камер, информации о позиционировании и навигации, а также служебной информации с датчиков робототехнического комплекса. К ноутбуку подключены система беспроводной приемо-передачи данных Wi-Fi и пульт дистанционного управления, на котором установлен джойстик и ряд кнопок-переключателей для выбора режимов функционирования пульта. Этот же пульт может быть подключен непосредственно к мехатронной системе по проводному каналу для обеспечения технологических действий, например, для отладки алгоритмов управления нижнего уровня, осуществления погрузки/разгрузки робототехнического комплекса и др.

Варианты полуавтономного управления тесно связаны со способами и техническими средствами позиционирования и навигации: так, оператор указывает ориентир (осуществляет «захват цели») и выбирает режим движения, в том числе скорость и трансмиссионную передачу. Для данного проекта мобильного робота рассматриваются следующие (типичные) варианты управления движением.

- Движение на ориентир, находящийся вне радиуса действия робота.
- Движение (возврат с разворотом) из точки останова в точку начала движения.

○ Движение (возврат задним ходом «вслепую») из точки останова в точку старта.

Движение по программе и нескольким ориентирам.

3. Алгоритмы управления являются производными от способов позиционирования, навигации и конкретизированных вариантов/режимов управления движением, т. е. от спецификации функций. С другой стороны, состав и математическая суть разрабатываемых алгоритмов будут во многом определяться аппаратной платформой, на которой планируется их реализация, включая интерфейсы и средства телекоммуникаций. Так, например, в настоящем проекте выделено три основных уровня вычислительных модулей: внешний компьютер (ноутбук); бортовой компьютер; многоканальный контроллер исполнительных устройств (мехатроники) и, дополнительно, пульт дистанционного управления, который может рассматриваться как дополнительный уровень (модуль). Для каждого модуля необходимо определить спецификацию функций, команд для их инициализации, служебных (информационных) данных и межмодульных интерфейсов.

При определении спецификации функций для каждого модуля принимался в расчет целый ряд технических условий, конструктивных ограничений, обсуждение которых выходит за рамки настоящей статьи. Заметим лишь, что в системе управления рассматриваемым робототехническим комплексом невозможно и/или нецелесообразно «скопировать» действия водителя обычного трактора даже в режиме дистанционного управления оператором. Так, часть манипуляций, таких как управление сцеплением, газом, торможением, подруливанием будут осуществляться регуляторами нижнего и верхнего уровней. Как результат комплексного решения был сформирован следующий перечень функций, реализуемых в соответствующих вычислительных модулях.

Пульт дистанционного управления. Оператор, посредством пульта вырабатывает следующие команды управления: «Подготовка к запуску двигателя»; «Запуск двигателя начальный»; «Выбор параметров вождения: номер передачи, полный привод»; «Выбор направление движения: вперед/назад»; «Начать движение»; «Поворот вправо/влево»; «Остановиться»;

«Останов двигателя»; «Указание ориентира и выдача команды «Захват»; «Выбор типового варианта полуавтономного управления и команды «Старт». Данный перечень может быть скорректирован по ходу развития НИОКР.

Внешний компьютер (ноутбук) предназначен для отображения: видеоданных с различных камер (выборочно, с неподвижной стереопары, с видеокамеры, размещенной на поворотной платформе); служебной информации (курсора/окна для выбора объекта захвата, сигнала подтверждения захвата, дальности до захваченного объекта); информации о позиционировании объекта и текущей информации о его навигации, выбранном режиме движения, а также для трансляция команд/данных с пульта на бортовой компьютер посредством беспроводной системы приема-передачи данных.

Бортовой компьютер реализует алгоритмические блоки видеопроцессора и автопилота. Видеопроцессор осуществляет: прием данных с различных видеокамер и временное хранение; сжатие видеоданных с определенного канала и выдача на внешний компьютер; прием указателя на захват объекта, команды захвата, «захват» указанного объекта с выдачей сигнала захвата на внешний компьютер; определение дальности до захваченного объекта с выдачей на внешний компьютер; сопровождение захваченного объекта. Автопилот осуществляет: вычисление данных позиционирования и навигации и выдача на внешний компьютер; прием команд управления с пульта дистанционного управления с выдачей на контроллер мехатроники; хранение типовых программ управления движения, дешифрация команд с пульта и с датчиков для инициации этих программ.

Многоканальный контроллер исполнительных устройств. Этот вычислительный модуль является компонентом мехатронной части робототехнического комплекса и может работать как от команд пульта, так и команд, формируемых Автопилотом. Число каналов контроллера определяется числом исполнительных устройств. Основное назначение алгоритмов и программ этого модуля – детализация команд верхнего уровня и их реализация с учетом механической специфики ходовой части мобильного робота. Например, команда верхнего уровня «Запуск двигателя» должна про-

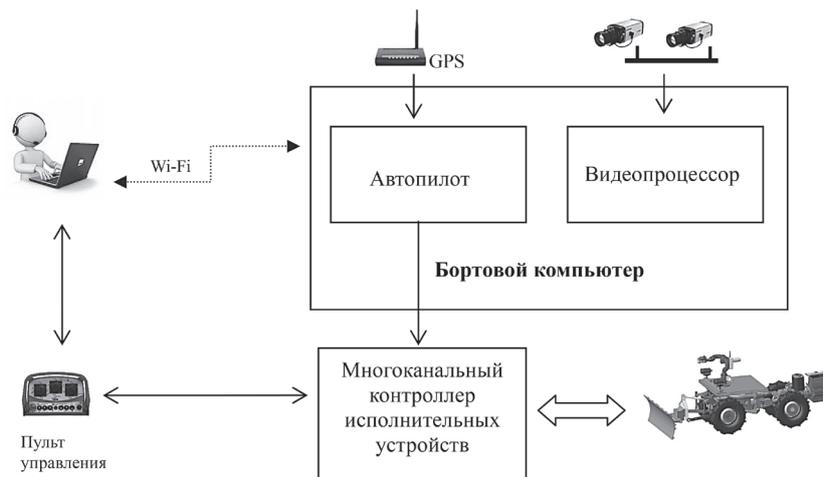


Рисунок 2. - Блок-схема системы управления мобильным роботом

верить установку трансмиссии на нейтральную передачу, установить требуемый уровень «педали» газа, выдать команду на пуск стартера, при получении сигнала с датчика о запуске, снизить уровень газа и т. д. Для некоторых команд верхнего уровня в микроконтроллере будут реализовываться алгоритмы регуляторов. Например, команда верхнего уровня «Начало движения» должна «выжать» сцепление, установить трансмиссию на заданную передачу, «отпустить» сцепление с учетом нагрузки на шасси и добавить газ. С учетом сделанных замечаний, упрощенная схема системы управления, распределенная по конструктивным вычислительным модулям, приведена на рис. 2.

Особенность предлагаемой системы управления состоит в том, что алгоритмы и, соответственно, программы управления представлены в двух уровнях.

Верхний уровень управления реализуется посредством оператора (с пульта управления) и/или бортового компьютера. Нижний уровень программ и регуляторов реализуется многоканальным контроллером исполнительных устройств. Нижний уровень будет консервативным, т. е. жестко привязанным к конструктивным особенностям механического шасси,

исполнительных устройств (актуаторам) и электронной части контроллера. В то же время верхний уровень будет доступен разработчику для гибкого применения авторских решений как в концептуальном, так и техническом плане. В целом это должно сократить сроки и стоимость разработки новых вариантов робототехнических комплексов различными авторскими коллективами для оригинальных приложений.

Заключение

В настоящей работе анонсирован проект создания одного из первых отечественных мобильных робототехнических комплексов, рассчитанных на серийное производство и промышленное внедрение. Одной из основных целевых функций проекта является обеспечение ценовой доступности продукта. По результатам уже выполненных этапов проекта стоимость мобильного робота ожидается в пределах 20–50 тысяч долларов, в зависимости от опциональной комплектации и навесного оборудования. Это становится возможным за счет максимального использования комплектующих отечественного производства (как серийного, так и заказного), а также применения концепции многоуровневой системы управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адунок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.adunok.by. Дата доступа 27.04.2014.
2. QinetiQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.qinetiq.com. Дата доступа 27.04.2014.
3. В Забайкалье на боевое дежурство заступил робот-пожарный [Электронный ресурс]/ МЧС России – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/item/3824166/>. Дата доступа 27.04.2014.
4. Тагур, М. М. Перспективы и проблемы создания отечественных мобильных робототехнических комплексов // Вестник БрГТУ: Физика, математика, информатика. – Брест. 2014.- № 5.- С. 32–35.

Поступила 12.05.15

Tatur M.

CONCEPT OF MANAGEMENT SYSTEM PLATFORM MOBILE ROBOT BASED ON SERIAL TRACTOR «BELARUS 132»

It is announced an innovative project to create a prototype multi-robotic system. A distinctive feature of the project – the maximum use of components and software of domestic production. The mobile robot used the concept of multi-level management system, according to which the majority of workload is on-board computer. This will reduce the amount of data transmitted over a wireless link, and increase the efficiency of the development of algorithms for higher-level control.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

УДК 621.396

ЛЯХ Б. А., КОНДРАТЕНКО В. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РАДИОМОНИТОРИНГА СИГНАЛОВ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ РАДИОСВЯЗИ КОРТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Военная академия Республики Беларусь

Описана структура модели, позволяющей провести оценку эффективности функционирования системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи коротковолнового диапазона в неблагоприятных условиях воздействия внешних помех.

Введение

Современный этап развития систем и средств связи различных диапазонов характеризуется совершенствованием технических средств их реализации. Однако несмотря на бурное развитие средств коммуникации УКВ диапазона (транкинговая, сотовая, спутниковая связь), позволяющих формировать широкополосные высокоскоростные каналы передачи информации, США, Германия, Китай, Россия и т. д. продолжают наряду с этим использовать относительно низкоскоростную и малокабельную коротковолновую (КВ) радиосвязь. При этом, как показано в [1], ведущие производители коммуникационного оборудования регулярно представляют свои новые разработки в области КВ радиосвязи, как для гражданских, так и специализированных пользователей. Для этого существует ряд причин:

– большая дистанция связи (от десятков до тысяч километров) без дополнительных затрат на оборудование сетей и, как следствие, низкая стоимость одного километра канала КВ связи по сравнению с другими системами радиокommunikаций;

– использование адаптивных методов установления и поддержания радиосвязи, базирующихся на современных технологиях цифровой обработки информации, позволяющих повысить качество и устойчивость КВ каналов радиосвязи.

Современные системы связи КВ диапазона характеризуются автоматизацией процессов

установления радиосвязи и гарантированной передачей информации, адаптивностью к помеховой обстановке в КВ диапазоне, возможностью организации аналоговых и цифровых сетей связи. Это стало возможным благодаря развитию технологии автоматического установления и поддержания радиосвязи (ALE – Automatic Link Establishment). Технология автоматического установления и поддержания радиосвязи в автоматическом режиме производит выбор канала связи, глубину помехоустойчивого кодирования и вида модуляции сигнала в зависимости от параметров канала связи, контролирует качество получаемых данных.

Режим автоматического установления и поддержания связи в КВ диапазоне является основным для систем и средств связи гражданского и специального назначения. Его применение регламентировано стандартами MIL-STD-188-141A и MIL-STD-188-141B (App. C).

Проведенный анализ показал, что существующие стандарты и сама технология ALE постоянно совершенствуются. В настоящее время системы и средства связи гражданского и специального назначения поддерживают режимы ALE второго и третьего поколения.

Одновременно с этим, в связи с имеющимися особенностями обработки радиосигналов адаптивных систем радиосвязи, существует необходимость в автоматизации процессов обнаружения, распознавания и выделения данных сигналов из всей совокупности радиосиг-

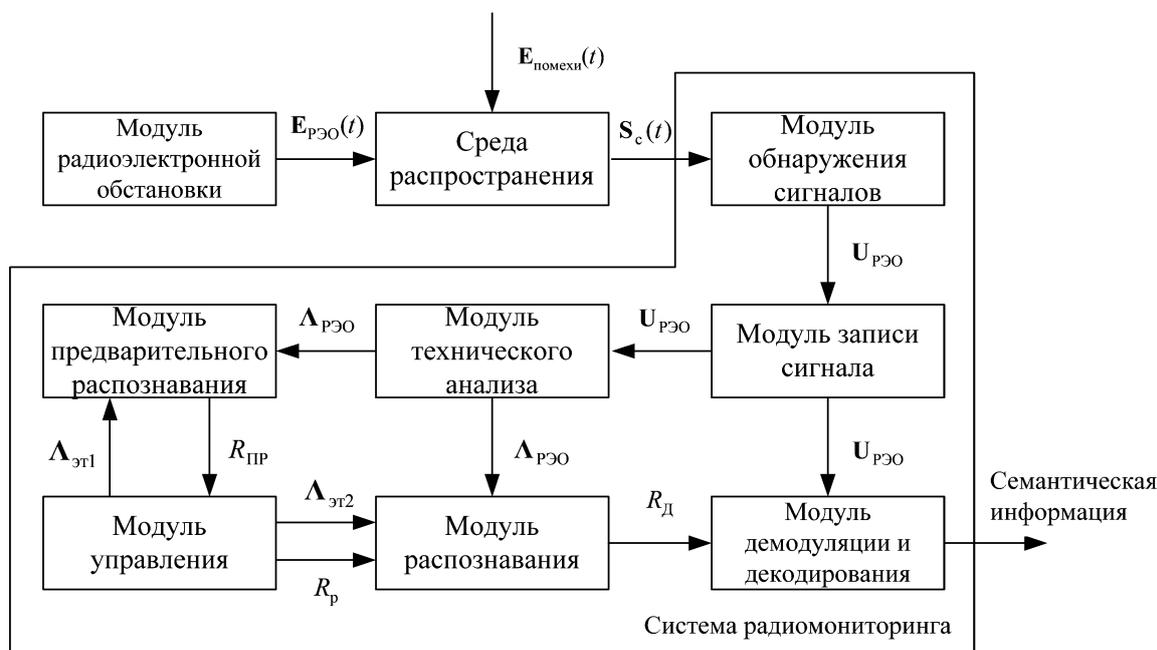


Рисунок 1. - Структура математической модели системы радиомониторинга

налов КВ диапазона, что является одной из актуальных задач процесса ведения радиомониторинга.

Система радиомониторинга адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона относится к классу больших систем, этапы проектирования, внедрения, эксплуатации и эволюции, которой в настоящее время невозможны без использования различных видов моделирования. На всех перечисленных этапах, как показано в [2], для различных уровней обработки системы радиомониторинга необходимо учитывать следующие особенности: сложность структуры и стохастичность связей между элементами, неоднозначность алгоритмов поведения при различных условиях, большое количество параметров и переменных, неполноту и недетерминированность исходной информации, разнообразие и вероятностный характер воздействий внешней среды и т. д. Согласно [3], ограниченность возможностей экспериментального исследования системы радиомониторинга делает актуальной разработку методики моделирования, которая позволила бы в соответствующей форме представить процессы функционирования системы радиомониторинга и получение результатов оценки характеристик исследуемых сигналов адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона с помощью математических моделей.

Математическое моделирование системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона

Основной задачей математического моделирования является оценка возможностей системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона обнаруживать, распознавать и принимать решения по дальнейшей обработке сигналов в сложной помеховой обстановке.

Для проведения исследований авторами разрабатывается математическая модель системы радиомониторинга сигналов адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона, структура которой представлена на рис. 1.

Представленная на рис. 1 схема не исчерпывает всего многообразия ситуаций, которые могут возникать в процессе ведения радиомониторинга адаптивных систем связи КВ диапазона, и является типовой схемой системы радиомониторинга. Она позволяет по результатам моделирования, по аналогии с [4], оценить взаимосвязь различных объектов (модулей) системы, провести выборку входных параметров, исследовать вопросы управления и дает возможность выделить те параметры, значения которых подлежат корректировке.

Совокупность ИРИ совместно с влиянием среды распространения (затухание, искажение и др.) и воздействием помех создает результи-

рующее электромагнитное поле радиосигналов $S_c(t)$, которое является входным вектором системы радиомониторинга:

$$S_c(t) = E_{PЭО}(t) + E_{помехи}(t),$$

где $E_{помехи}(t)$ – вектор, описывающий искажающее влияние среды распространения радиоволн и помехи (естественные и искусственные).

Реализация $S_c(t)$ поступает на вход системы радиомониторинга. Ее первым блоком является модуль обнаружения сигналов, который осуществляет обнаружение и аналого-цифровое преобразование (АЦП) $S_c(t)$.

Состав модуля, в зависимости от задач обнаружения, может включать различные технические средства: блоки АЦП, антенно-фидерная система (пассивная или активная), радиоприемные устройства (одноканальные или многоканальные), пеленгатор и др.

Как показано в [4], основными техническими характеристиками модуля обнаружения сигналов, позволяющими сравнивать различные варианты построения, являются: чувствительность приемников, ширина полосы частот одновременного приема, сектора направлений одновременного приема сигналов по азимуту и углу места, пропускная способность по потоку обрабатываемых сигналов, динамический диапазон в односигнальном и многосигнальном режиме, разрешающая способность измерения основных первичных параметров сигналов.

В качестве критериев обнаружения сигналов могут использоваться: диапазон частот, пеленг, уровень мощности входного сигнала, время наблюдения и т. д.

На выходе модуля обнаружения формируется вектор $U_{PЭО}$ совокупности обнаруженных сигналов:

$$U_{PЭО} = \sum_{j=1}^N U_j,$$

где U_j – вектор j -го сигнала.

Каждый обнаруженный сигнал вектора $U_{PЭО}$ сохраняется в модуле записи сигнала и поступает на модуль демодуляции и декодирования, а также – на модуль технического анализа, который формирует вектор $\Lambda_{PЭО}$ в виде сгруппированных по каждому j -му сигналу вектора $U_{PЭО}$ упорядоченных наборов данных, содер-

жащих результаты технического анализа параметров сигналов в соответствующем формате:

$$\Lambda_{PЭО} = \begin{bmatrix} f_{o1}, T_{o1}, E_{o1}, \Delta f_1, TM_1, M_1, V_{M1} \\ f_{o2}, T_{o2}, E_{o2}, \Delta f_2, TM_2, M_2, V_{M2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{oN}, T_{oN}, E_{oN}, \Delta f_N, TM_N, M_N, V_{MN} \end{bmatrix},$$

где f_o – центральная частота сигнала; T_o – длительность сигнала; E_o – амплитуда сигнала; Δf – ширина спектра сигнала; TM – вид модуляции сигнала (АМ, ЧМ, ФМ); M – количество позиций модулированного сигнала с фазовой модуляцией (ФМ-2, -4, -8); V_M – скорость манипуляции для сигналов с ФМ-2, -4, -8.

Для выделения сигналов адаптивной системы радиосвязи из всей совокупности $\Lambda_{PЭО}$ в модели используется два модуля: модуль предварительного распознавания и модуль распознавания. Использование двух модулей обуславливается необходимостью сокращения времени процесса распознавания и дальнейшей обработки, так как вероятность вскрытия адаптивной системы связи, меняющей за сеанс связи частоты приема/передачи и режимы работы, зависит от скорости обнаружения, распознавания и обработки этих сигналов.

Модуль предварительного распознавания выполняет задачу «прореживания» вектора $\Lambda_{PЭО}$ с целью исключения из дальнейшей обработки сигналов, которые не принадлежат адаптивной системе связи. В качестве эталона используется вектор $\Lambda_{эт1}$ формата:

$$\Lambda_{эт1} = \{F_{н}, \Delta F, V_M\}.$$

В случае если анализируемые параметры i -го сигнала $\Lambda_{PЭО}$ совпадают с эталонными значениями $\Lambda_{эт1}$, в модуле предварительного распознавания формируется сигнал управления $R_{ПР}$, который поступает на вход модуля управления и содержит индекс сигнала $N_{инд}$ из совокупности $\Lambda_{PЭО}$, который подлежит последующему распознаванию в модуле распознавания.

Модуль управления предназначен для управления системой распознавания сигналов и формирования эталонных значений $\Lambda_{эт1}$ и $\Lambda_{эт2}$. При поступлении $R_{ПР}$ на вход модуля управления на его выходе формируется сигнал управления R_p , содержащий разрешающую команду на выполнение процедуры распознавания и индекс сигнала $N_{инд}$ совокупности $\Lambda_{PЭО}$.

который подлежит распознаванию, и эталонный вектор $\Lambda_{\text{эт2}}$ формата:

$$\Lambda_{\text{эт2}} = \{T_{\text{и}}, n_{\text{м}}, \nu_{\text{м}}, U\}.$$

Модуль распознавания, получив от модуля управления сигнал $R_{\text{р}}$ и вектор $\Lambda_{\text{эт2}}$, производит сравнение оставшихся параметров сигнала с индексом $N_{\text{инд}}$ совокупности $\Lambda_{\text{рЭО}}$ с вектором $\Lambda_{\text{эт2}}$ и, в случае их совпадения, на выходе модуля формируется сигнал управления $R_{\text{д}}$, содержащий разрешающую команду на выполнение процедуры демодуляции и декодирования и индекс сигнала $N_{\text{инд}}$ совокупности $\text{У}_{\text{рЭО}}$, который подлежит обработке.

Модуль демодуляции и декодирования, получив разрешение на выполнение, запрашивает из модуля записи сигнал с индексом $N_{\text{инд}}$ и выполняет операции демодуляции и декодирования, а в случае успешной реализации на

выходе модуля формируется семантическая информация в виде документов: doc, xls, txt, pdf, rtf и др.

Заключение

Представленная структура модели системы радиомониторинга адаптивных систем радиосвязи КВ диапазона позволит в дальнейшем провести оценку весовых коэффициентов их признаков, что может привести к значительному сокращению времени моделирования.

Целями дальнейших исследований являются: декомпозиция процесса получения информации и обоснование содержания основных этапов обработки сигналов, а также оценка эффективности, адекватности и универсальности представленной модели системы радиомониторинга.

Литература

1. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / Под ред. профессора О. В. Головина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 598 с.
2. Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
3. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
4. Радзиевский В. Г., Сирота А. А. Теоретические основы радиоэлектронной разведки. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.

Поступила 10.03. 15

ЛІАКН В. А., KONDRATYONOK V. A.

MODELLING OF RADIO MONITORING SYSTEM OF SHORT-WAVE RADIO COMMUNICATION ADAPTIVE SYSTEMS

The structure of model which allows to spend an estimation of system functioning efficiency of radio monitoring system of short-wave radio communication adaptive systems in adverse conditions of influence of external jams is described.

УДК 625.11

ФЕДОРОВ А. А., НОВИКОВ С. О.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВРИСТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ОПТИМАЛЬНОГО ДЕРЕВА РЕШЕНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ БЮДЖЕТОМ

Белорусский национальный технический университет

В данной статье рассмотрены сервисы, позволяющие контролировать расходы денежных средств. Был проведен сравнительный анализ данных сервисов, представляющих сравнимый функционал, их обзор, а также выделены ключевые особенности.

Введение

В современных условиях прогрессивно развивающихся технологий, производств, услуг все большее значение приобретают сервисы, способные максимально облегчить повседневную жизнь как целого общества, так и каждого человека в отдельности. Все более популярными среди населения становятся безналичные расчеты с использованием банковских карточек, именно поэтому возникает актуальная необходимость контролировать движение собственных средств в режиме реального времени, и чем более наглядно представлен анализ расходов (уже совершенных и запланированных), тем эффективнее происходит распределение «денег».

Ниже приводится краткий список проектов, представляющих сравнимый функционал, их обзор и выделение ключевых особенностей.

Дзен-мани

Данный проект довольно молодой (примерно 2010) и представлен на российском рынке, на текущий момент (февраль 2014 года), 4035 предпринимателей, фрилансеров, семей ведут свою домашнюю бухгалтерию в этом проекте – число отражает количество активных пользователей. [1]

Основные идеи которые выдвигает проект звучат так: планирование своих расходов и доходов; составление прогнозов и контроль за исполнением бюджета; объединение всех своих финансов в одной системе; ведение общего уче-

та наличных, карт, ПИФов, кредитов и вкладов; сравнение самые прибыльные предложения банков; предоставление сервиса подбора вкладов.

Данный проект представляет собой интернет портал и мобильное приложение для платформы iOS, Android. Кроме этого существует отдельная мобильная версия сайта.

Из интересных особенностей в проекте реализовано автоматическое распознавание магазина и категорий товаров и услуг в транзакциях.

Безопасность пользовательских данных обеспечивается за счёт анонимной регистрации в системе. Сервис не запрашивает и не хранит информацию о пользователях. Все данные передаются по безопасному HTTPS протоколу с использованием 256-разрядного шифрования.

На данный момент автоматизированы шесть не самых популярных банков (ВТБ24, Citibank, Банк Спб, Банк 24 ру, Ханты-Мансийский банк и Мастер банк), автоматизация реализована через парсинг email оповещений от банка. Хотя учет и происходит автоматически, но требует звонка в банк (часто эта услуга еще и платная) и ручного добавления всех счетов.

Полу-автоматически работает учет Альфа банка и Райффайзен банка, через парсинг страниц интернет-банка, хотя это и похоже на принцип работы американских дата-провайдеров, но все же неудобно – каждый раз приходится заходить на страницу интернет-банка и запускать парсинг вручную.

Mint

MINT – исключительно успешный сервис для учета персональных финансов, основанный в 2006 году.

Mint.com – ветеран в категории финансовых приложений. Его первая версия появилась еще в 2008 году. С тех пор программу скачали более 13 млн пользователей по всему миру. Не в последнюю очередь пользователей привлекает надежная система безопасности. [2]

Сервис автоматически подхватывает все доходы, расходы, кредиты, вклады, пифы, раскладывает их по категориям (еда, бензин, одежда, авто...) и строит красивые графики. Все это делается в один клик, вводить вручную ничего не нужно! Учитывая, что 90% трат и доходов населения, использующего в качестве платежного средства пластиковую карточку, проходит через банковские счета и карты, получаем идеальный учет личных финансов.

Balance BY

Автоматическая проверка баланса аккаунтов сотовых операторов и провайдеров Беларуси. Приложение представлено на рынке Республики Беларусь в 2010 году.

Основная идея проекта. В каждой семье есть несколько сотовых телефонов, подключенных к разным операторам – становится всё сложнее уследить, когда пришла пора пополнить нужный счёт, как мало осталось льготных минут, сколько осталось prepaid трафика. Использование данного проекта сводит все дополнительные действия к нулю, и иметь полную информацию о своём балансе становится очень просто. Достаточно один раз настроить программу Balance BY. Разные операторы сотовой связи, разные провайдеры Интернета – единое универсальное решение для Беларуси. [3]

Особенности, приложение доступно только для ОС Android. Приложение представляет собой набор парсеров для множества информационных порталов в РБ и получает доступ по введённым пользователем данным для входа в ту или иную систему. В последней версии приложения появилась поддержка порталов интернет-банкинга белорусских банков, для возможной получения баланса по банковским картам.

Для каждой мобильной платформы существуют финансовые приложения, которые помогают контролировать личные финансы.

Отличие в них можно свести к разному способу ввода финансовой информации в программу, наглядности, и охватываемой области контроля над финансами.

Большинство из них предлагают вводить данные вручную, задавать категорию, тип и сумму, финансовой операции – это не самый удобный способ. Некоторые приложения могут сами заполнить расходы, считав их из чека, но открытым остаётся вопрос, как поступить, если чека не было.

Многие приложения могут похвастаться сложными графиками и диаграммами расходов и доходов. Некоторые позволяют учитывать займы и кредиты и отсылают уведомления пользователям о необходимости погашения кредитов и оплаты услуг.

Отдельные приложения позволяют сопровождать каждую транзакцию дополнительно информацией, например, фотографией чека, голосовой заметкой, или гео-положением, прогнозировать расходы.

Кто-то предлагает контролировать арендную плату, счета за коммунальные услуги.

Расчеты в разных валютах, возможность поиска по финансовым операциям, или подсказки пользователям по снижению трат, не очень распространённые возможности.

Если использовать заданные инструменты, как задумывали авторы, легко можно понять, сколько денег потрачено, а сколько осталось в запасе. Но удобство от использования таких инструментов ненамного выше чем лист бумаги и карандаш или приложения для персонального компьютера.

Заключение

Существует множество мобильных приложений для управления бюджетом, но все они имеют существенный недостаток, это способ получения финансовой информации, пользователю, приходится самому заботиться о вводе и достоверности финансовых данных. В этом плане самым перспективным выглядит сервис Mint, взаимодействующий непосредственно с финансовыми организациями.

Другая, самая главная проблема существующих приложений – это решение, которое мы получаем после использования данной системы. Это решение может изменяться каждую секунду, в то время как пользователь не смо-

жет адекватно реагировать на решения принимаемые существующими приложениями.

В связи с этим существует необходимость в разработке сервиса, который мог бы использовать эвристические алгоритмы для построения оптимального дерева решений. Зачем нужен этот проект обычным пользователям? Во-первых, чтобы чем-то управлять это нужно измерить. Например, знаете ли вы сколько денег у вас уходит на посещение кафе и ресторанов? Быть может, если готовить дома, вы сможете купить автомобиль в кредит. Или наоборот, отказавшись от поездок на авто, обедать в ресторанах по выходным. Во-вторых – планирование. В сервисах учета финансов можно легко добавить крупные покупки и рассчитать, когда вы сможете их осуществить и сколько необходимо откладывать.

Одной из задач является предоставить пользователю действительно гибкий и удобных сервис, сочетающий в себе механизм электронного кошелька и аналитику финансов.

Основная цель – дать возможность пользователю собрать всю свою финансовую информацию в одном месте: информацию о поступлении денег и их расходах, информацию о кредитах, долгах, регулярных платежах и т. п.

Сервис с первую очередь предназначен, для того, чтобы позволить управлять всеми аспектами личных финансов в одном месте, а для этого требуется получить всю необходимую информацию. Сервис позволит сделать управление деньги легче, потому что, при каждой транзакции, которую совершает пользователь, автоматически будут обновляться все эти данные.

Существуют определённые сложности в определении категорий операций, и для того чтобы правильно классифицировать транзакции на начальных этапах пользователям придется вручную их изменять, для получения точной картины.

Данный сервис опирается на методы принятия решений. Для принятия решения необходимо для начала классифицировать затраты. Затраты бывают двух типов релевантные и нерелевантные. Релевантные затраты – это будущие расходы, которые могут быть изменены вследствие принятия решения. То есть это за-

траты, которые зависят от решения, которое мы принимаем. Нерелевантные расходы – затраты, не зависящие от принятия решения. Например, нерелевантной есть страховка автомобиля, ее надо платить в любом случае. Одной из задач сервиса является определить, какие затраты являются релевантными, и осуществить дифференциальный анализ.

Вторым этапом является определить под какую категорию попадают товары или услуги приобретенные пользователем. Для этого необходимо использовать теорию вероятности и математическую статистику. Это обусловлено тем, что алгоритм программы сталкивается с проблемами, которые в большинстве связаны с анализом влияния случайных фактов, требуют принятия решений в ситуациях, имеющие вероятностную основу. Для этого необходимы прочные логические и стохастические знания. Приложение автоматически разделяет транзакции совершенные по пластиковым карточкам на категории. Стоит однажды заплатить за продукты в торговом магазине и помечать эту транзакцию как оплата за продукты, и следующие платежи, совершенные в этом месте, будут отнесены к данной категории.

Следующим этапом является принятия решения исходя из полученных данных. Дерево решений – один из таких методов автоматического анализа данных. Первые идеи создания деревьев относятся к работам Ховленда (Noveland) и Ханта (Hunt). Однако, основополагающей работой, давшей импульс для развития этого направления, явилась книга Ханта (Hunt, E. B.), Мэрина (Marin J.) и Стоуна (Stone, P. J) «Experiments in Induction» (1966 г.). Проблема получения оптимального дерева решений является не полной с точки зрения некоторых аспектов оптимальности даже для простых задач. Таким образом, практическое применение алгоритма деревьев решений основано на эвристических алгоритмах, где единственно оптимальное решение выбирается локально в каждом узле. Такие алгоритмы не могут обеспечить оптимальность всего дерева в целом. На сегодняшний день существует большое число алгоритмов, реализующих деревья решений: CART, C4.5, CHAID, CN2, NewId, ITrule и другие.

Литература

1. Дзен-мани [Электронный ресурс] / Сервис и мобильное приложение для учета и планирования расходов. – Москва, 2010. – Режим доступа: <https://zenmoney.ru>. – Дата доступа: 08.09.2014.
2. Mint[Электронный ресурс] / Сервис для учета персональных финансов. – New York, 2006. – Режим доступа: <https://www.mint.com>. – Дата доступа: 15.07.2014.
3. Balance BY[Электронный ресурс] / Автоматическая проверка баланса аккаунтов сотовых операторов и провайдеров Беларуси. – Минск, 2010. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/balancebelarus/>. – Дата доступа: 09.11.2014.

Поступила 10.03.15

Fiodarau A., Novikov S.

HEURISTIC ALGORITHMS USAGE WHILE CONSTRUCTION OF OPTIMAL DECISION TREE FOR BUDGET MANAGEMENT

The article deals about services that give opportunities to control cash flows. In the article a comparing analyse of the services, that provide comparable functionality was held, their review was given and key features were marked out.

УДК 004.91 + 347.78.031

РУДИКОВА Л. В.

О РАЗРАБОТКЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ, СВЯЗАННЫХ С ЛАЗЕРНОЙ ЭКСПРЕССНОЙ ЭКСПЕРТИЗОЙ

Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Рассматриваются общие подходы к созданию универсальной Интернет-системы, предназначенной для сбора, хранения и обработки данных, связанных с лазерной экспрессной экспертизой. Система основана на клиент-серверной архитектуре, в которой пользователям доступен веб-интерфейс. С помощью предлагаемой разработки можно обрабатывать и анализировать результаты экспертизы объектов художественной ценности и сопутствующие данные.

Введение

Разработка универсальной Интернет-системы, которая позволяет поддерживать различные этапы, связанные с проведением лазерной экспрессной экспертизы, автоматизировать процессы хранения и поиска данных с целью их дальнейшей обработки и получения требуемых экспертных заключений, является достаточно трудоемкой и актуальной задачей. Предлагаемые результаты представляют собой расширения общей концепции и реализации Интернет-системы, предназначенной для поддержки различных этапов лазерной экспрессной экспертизы [1–3].

Об особенностях предметной области, связанной с проведением экспертизы объектов различной природы

Оптический эмиссионный спектральный анализ (ОЭСА) является одним из наиболее распространенных методов анализа элементного состава материалов [4]. Главным достоинством ОЭСА является быстрота (экспрессность) наряду с высокой точностью и низкими пределами обнаружения, а также низкая себестоимость, простота пробоподготовки.

В научных исследованиях, связанных с экспрессной лазерной экспертизой, с одной стороны, играет обработка полученных данных снятых спектров за короткое время, их нако-

пление в базе данных и дальнейшее использование на различных этапах лазерной экспрессной экспертизы. С другой стороны, интересным представляется анализ накопленных данных: применение аналитических структурных методов может позволить найти новые знания в разрезе имеющихся опытных данных и баз отснятых спектров.

Следует отметить, что программное обеспечение, которое поддерживает те или иные работы, связанные с проведением лазерной экспрессной экспертизы, в данный момент существует, но существует необходимость в авторизованном доступе к результатам исследований, а также в комплексной и разносторонней обработке данных. В силу этого актуальным является расширение универсальной веб-системы в двух аспектах: создание хранилища с возможностью последующего анализа данных и разработка системы поддержки экспертизы объектов различной природы, в частности, объектов художественной ценности (произведения искусства, в частности, произведения живописи). Рассмотрим основные аспекты, связанные с деятельностью эксперта-исследователя.

Работа экспертов состоит в проведении комплексной экспертизы, включающей различные направления технико-технологической и предметно-ориентированной экспертизы. Экс-

перт должен предоставить результаты работы в виде заключения (отчет, расчеты и т. п.), которое должно быть достаточно полным и подробным. Заключение эксперта должно обязательно включать: наименование объекта исследования; используемые методы исследования, дату исследования; заключение об объекте исследования; данные об эксперте.

В настоящее время при проведении исследований различных объектов, материалов и веществ большую роль стали играть технико-технологические исследования, среди которых особое место занимают спектроскопические методы анализа вещества. Наиболее распространенными являются: рентгено-флуоресцентный анализ (РФА), спектроскопия комбинационного рассеяния (КР), микроскопический анализ, инфракрасная (ИК) спектроскопия поглощения, исследования в ультрафиолетовых (УФ) лучах и, в последнее время, лазерный эмиссионный спектральный микроанализ. Лазерный эмиссионный спектральный микроанализ дает возможность экспрессного определения элементного состава вещества без отбора пробы, и обладает рядом преимуществ по сравнению с указанными выше. Так, лазерный эмиссионный спектральный микроанализ позволяет анализировать элементный состав, как твердых веществ, так и жидкостей, а также дает возможность локального, поверхностного и послойного определения элементов, что позволяет изучать однородность материалов и распределение элементов. Существуют и ограничения, связанные с матричными эффектами, влиянием окружающей среды, однако постоянно развивающиеся лазерные технологии позволяют свести их к минимуму.

Лазерная технологическая экспертиза является для абсолютного большинства физико-химических лабораторий, учреждений и музеев новой и пока остается недоступной для массового использования. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия может применяться в качестве экспресс метода определения элементного состава художественных материалов, и во многих случаях является достаточной, чтобы выявить подделку. Следует отметить, что на современном инструментально-методическом уровне лазерный спектральный микроанализ является эффективным и перспективным методом материаловедческой экс-

пертизы, прежде всего, историко-художественных ценностей.

Следует отметить, что вся работа эксперта по подготовке и составлению отчета требует длительного времени и мало автоматизирована. Кроме того, отсутствует также и программное обеспечение, позволяющее, получить необходимую информацию по объектам исследований и заключениям экспертов.

Основные возможности системы, связанные с формированием экспертных заключений

Отметим, прежде всего, что предлагаемая универсальная система предназначена для поддержки различных этапов, связанных с проведением всех этапов лазерной экспрессной экспертизы: визуализацией полученных спектров, сохранением их в базе данных, работой с различными библиотеками спектральных линий и т. д. Кроме того, возможно расширение системы за счет соответствующих модулей обработки данных, баз данных опытных исследований, эталонных образцов, модулей OLAP-средств и т. п. В целом, система может быть использована для подготовки итоговых заключений экспертов при исследованиях технологических изделий, историко-художественных ценностей, объектов окружающей среды, биоструктур, а также для проведения анализа имеющихся данных (в случае разработки хранилища данных и использования соответствующих методов OLAP и Data Mining).

Итак, предлагаемая универсальная система направлена на использование через веб-браузер, носит модульный характер и является расширяемой. Применительно к данной системе, следует отметить следующие особенности. Система также должна хранить расширенные данные об объекте исследования, его характеристиках, а также материалах, используемых при его создании.

На рисунке 1 представлена диаграмма вариантов использования, которая отражает необходимые функции для поддержки работы с системой эксперта-исследователя: добавление и модификация данных, связанных с объектом исследования и проведением экспертиз, выбор методики исследования, подготовка различного плана отчетов, аналитических сводок и итогового документа проведенной экс-

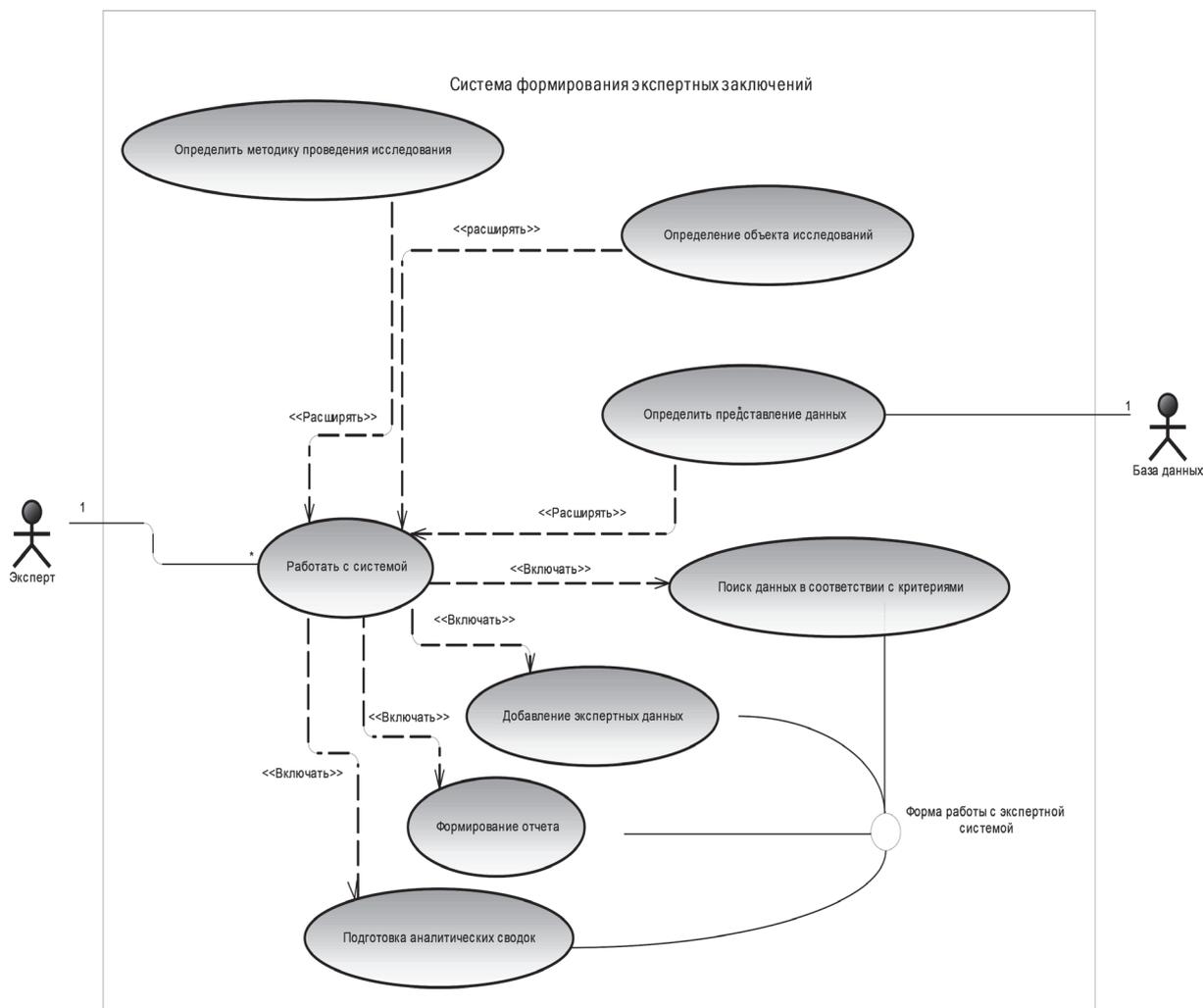


Рисунок 1. - Диаграмма вариантов использования для эксперта-исследователя

пертизы, поиск данных, включая сложные условия поиска, а также возможность определения структуры данных, которые будут добавляться в базу данных.

При подготовке итогового документа эксперту обязательно необходимо уточнить следующие аспекты: вид и тип объекта, название, размеры, принадлежность к типу, состав, дата создания и др. С учетом того, что наиболее часто экспертизе подвергаются объекты живописи и объекты художественной ценности, катальным являются следующие аспекты научной экспертизы: решение вопроса об авторстве (установление, подтверждение или отклонение авторства); датировка произведения и определение школы живописи; определение иконографии произведения; решение вопроса об оригинальности или вторичности работы; разграничение по типу вторичности (копия, авторское или соавторское повторение, принадлежность

к мастерской, кругу, школе либо последователю мастера, имитация, подделка, стилизация); определение состояния сохранности и определение художественного уровня произведения.

О модели данных для предметной области художественных экспертиз

Для получения модели данных используется структурная методология и общие принципы концептуального проектирования. Выделяются сущности системы, определяются ограничения на данные, ограничения целостности и пользовательские ограничения.

На данном этапе уточнены основные сущности уже существующей универсальной системы, поддерживающей отдельные аспекты лазерной экспрессной экспертизы, а также разработаны отдельные фрагменты, связанные с проведением экспертных заключений и произведениями художественной ценности.

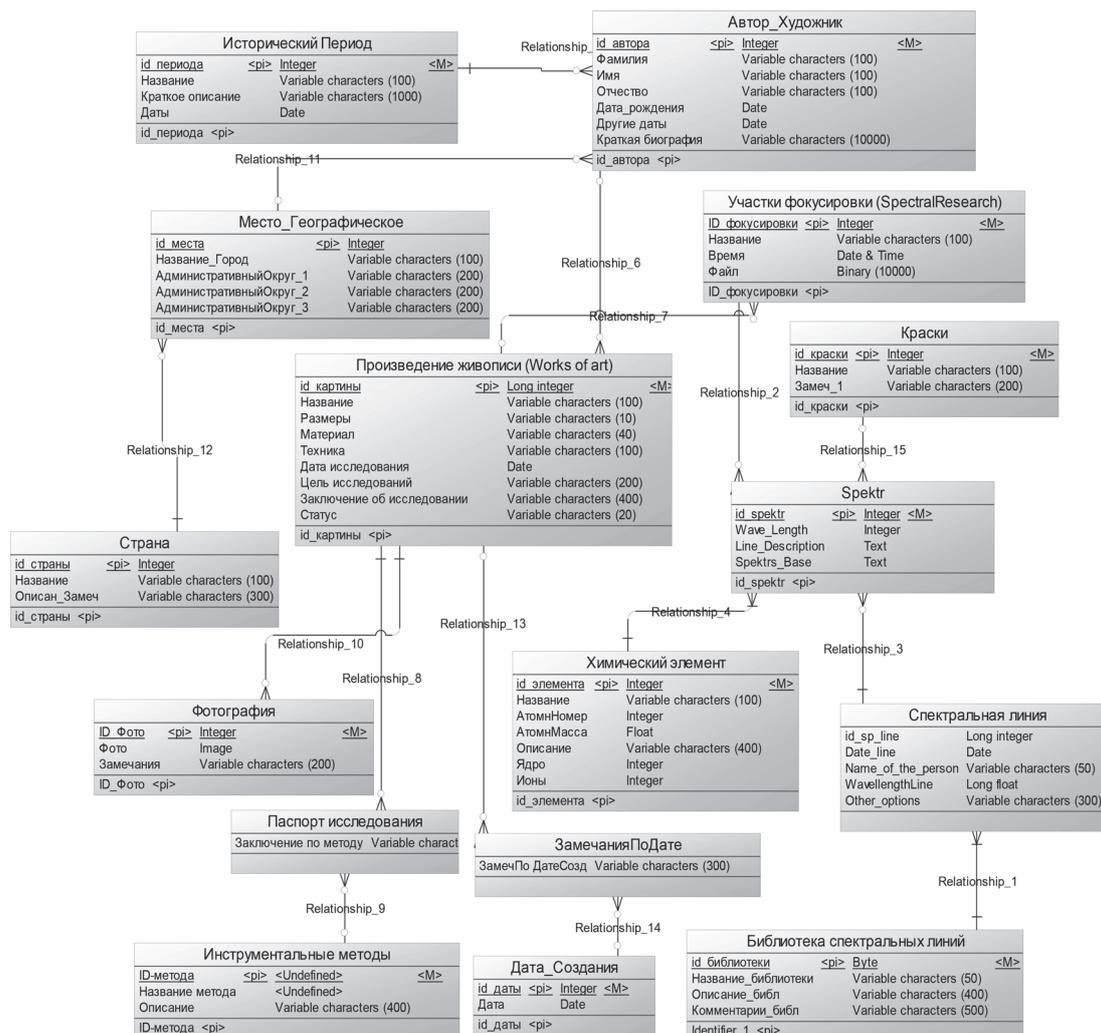


Рисунок 2. - Фрагмент концептуальной модель данных, связанный с исследованием объектов художественной ценности

Следует отметить, что система предполагает поддержку проведения количественного и качественного спектрального анализа различных элементов. Для автоматизации процесса поиска и сопоставления характеристик элементов предусматривается, во-первых, наполнение библиотеки имеющимися базами линий (со всеми необходимыми характеристиками) с указанием учреждения их регистрации, а также, возможностью будущего пополнения за счет новых регистраций и исследований.

Так, прежде всего, в системе учитывается информация следующего плана: об элементе, длинах волн, источнике возбуждения, интенсивности линии в зависимости от источника возбуждения, потенциале ионизации, наличии самообращения линий, принадлежности спектру нейтрального атома или иона. Также, хранится информацию о месте регистрации кон-

кретного спектра и отдельных свойств, дате регистрации, экспериментаторах и некоторой другой информации. Все это будет способствовать оптимизации работ при проведении спектрального анализа.

Фрагмент концептуальной модели данных, выполненной средствами Power Designer, для хранения данных об объектах художественной ценности и экспертизах, представлен на рисунке 2.

Об общей архитектуре универсальной системы обработки данных, связанных с лазерной экспрессной экспертизой

Общая архитектура реализации системы представлена на рисунке 3. Система представляется в виде трех уровней, имеющих минимальные связи между собой: база данных; сер-

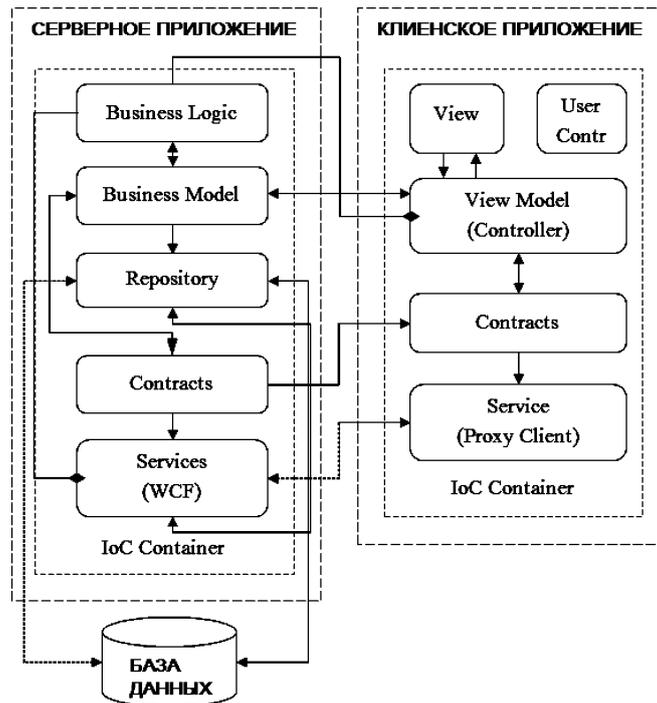


Рисунок 3. - Общая архитектура реализации

верное приложение и пользовательское приложение.

База данных (Database) представляет собой отдельный сервер, на котором развернута СУБД. Уровень базы данных связан с сервисным проецированием бизнес-моделей на реляционные сущности базы данных с помощью репозитория (компонент Repository). Репозиторий также ответственен за работу с данными (сохранение, обновление, удаление, выборка). Основой репозитория является технология ADO. NET Entity, которая позволяет преобразовывать LINQ-запросы и другие выражения в эквивалентные SQL-запросы, а результаты выполнения запросов к объектам бизнес-сущностей.

Сервисное приложение (Back-end) представлено WCF-сервисами. Для уменьшения зависимостей между компонентами данного уровня используется IoC-контейнер. Уровень сервисного приложения включает в себя следующие компоненты.

- Бизнес логика (Business Logic). Реализация логики по работе со спектрами, логика экспертной системы, логика работы с бизнес-сущностями и др.

- Бизнес модели (Business Model). Определены сущности, отражающие предметную область в виде объектов системы.

- Репозиторий (Repository). Реализация логики по работе с данными, формированию запросов к базе данных, проецирование бизнес-моделей на сущности БД, преобразование запросов в эквивалентные SQL-запросы и обратное преобразование результатов выполнения запросов к объектам бизнес-сущностей с использованием технологии ADO. NET Entity Framework, выбор провайдеров, в зависимости от типа базы данных.

- Контракты (Contracts). Описание операций, реализуемых сервисом.

- Сервисы (WCF Services). Реализация контрактов, предоставление конечных точек сервиса, определение протоколов, адресов, типов шифрования передачи данных и др.

Пользовательское приложение (Front-end) зависит от сервисного приложения в виде контрактов, реализованных сервисным приложением. Пользовательское приложение также включает компонент бизнес-моделей, для отображения информации, запрошенной у сервисного приложения. Уровень пользовательского приложения включает в себя следующие компоненты: Пользовательское представление (View); Пользовательские элементы управления (User Controls); Модель представления (View Model); Контракты (Contracts); Сервисы (Service Proxy Client).



Рисунок 4. - Главная страница универсальной системы обработки данных, связанных с лазерной экспрессной экспертизой

Следует отметить, что предлагаемая универсальная система (рисунок 4) реализована с использованием следующего программного обеспечения: СУБД Microsoft SQL Server 2012 Standard; ОС Microsoft Windows 7 (Windows 8); Net Framework 4.5.

Заключение

Разработанная система обработки данных, связанных с лазерной экспрессной экспертизой, предлагает пользователям удобный интерфейс для осуществления гибкого просмотра информации, настройки личного кабинета, выполнения необходимых операций по подготовке экспертных заключений и т. д. Предлагаемое программное обеспечение является актуальной разработкой и представляет собой веб-ресурс, который позволит собирать в единую базу данных достаточно широкий

спектр информации, связанный с проведением лазерной экспрессной экспертизы, а, в дальнейшем, проводить и анализ имеющихся данных с использованием методов Data Mining и OLAP.

Результаты работы получены в процессе выполнения ГПНИ «Разработка научно-методического обеспечения практического использования мобильных лазерных спектроаналитических систем и рентгенофлуоресцентного анализатора для экспрессной материаловедческой экспертизы в инновационных технологиях, предотвращении чрезвычайных ситуаций, экологии, криминалистике, сохранении историко-художественного наследия. Разработка и адаптация программного обеспечения для использования при проведении экспрессной материаловедческой экспертизы различных изделий и образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудикова, Л. В. Универсальная комплексная система, поддерживающая организацию лазерной экспрессной экспертизы // Л. В. Рудикова / Доклады БГУИР. – Мн.: БГУИР, 2013. – № 3 (73) – С. 26–32.
2. Рудикова, Л. В. Разработка программного визуализатора спектров для поддержки лазерной экспрессной экспертизы // Л. В. Рудикова / Доклады БГУИР. – Мн.: БГУИР, 2014. – № 1 (79) – С. 46–52.
3. Рудикова, Л. В. О разработке системы для поддержки лазерной экспрессной экспертизы. Монография / Л. В. Рудикова. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 134 с.
4. Burakov, V. S. Quantitative analysis of alloys and glasses by a calibration-free method using laser-induced breakdown spectroscopy // V. S. Burakov, S. N. Raikov / Spectrochimica Acta. Part B. – 2007. – V. 62. – P. 217–223.

Поступила 10.03. 15

Rudikova L.

UNIFIED DATA PROCESSING SYSTEM DEVELOPMENT FOR AN EXPRESS LASER EXAMINATION

The article describes general approach to the creation of an universal Internet-system, which is designed for the collection, storage and processing of data, which related with an express laser examination. The system is based on client-server architecture. The user interface is implemented as a web-page. The system allows storing and processing results of examination of works of art and related data.

РЫБАК В. А.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В статье описан авторский метод применения генетических алгоритмов для решения задач оптимизации качества окружающей среды. Исходными данными выступают числовые оценки качества каждого из исследуемых природных компонентов на выделенном подрайоне. Учитываются атмосферный воздух, почвенный покров, водные ресурсы, зеленые насаждения, уровень шума и вибрации, уровень электромагнитных излучений и объем образования отходов.

Введение

Отмечая, что генетические алгоритмы (ГА) позволяют осуществлять поиск оптимальных решений для целого ряда практических задач, также заметим, что широта сферы применения ГА обусловлена, прежде всего, универсальностью, а также способностью одновременно оптимизировать решение задачи по нескольким критериям.

Анализ результатов использования ГА позволяет выделить следующие условия, при выполнении которых задача решается эффективно:

- большое пространство поиска, ландшафт которого является негладким (содержит несколько экстремумов);
- сложно формализуемая функция степени оценки качества решения;
- многокритериальность поиска;
- поиск по заданным критериям приемлемого, а не единственного оптимального решения.

Очевидно, что задача оптимизации качества городской окружающей среды (ОС) соответствует всем перечисленным условиям и, таким образом, может быть эффективно решена с использованием ГА. Исходными данными при этом являются балльные оценки функционально-ландшафтных зон урбанизированной территории, отражающие экологическое состояние атмосферного воздуха, почвенного покрова, водных ресурсов, лесных насаждений, уровень шума и вибрации, электромагнитных

излучений и объёмов накопления отходов. При этом стоимость приращения балльной оценки (улучшения качества) для различных показателей существенно отличается.

1. Постановка задачи:

Разработать наиболее оптимальный план вложения выделенных финансовых средств на осуществление природоохранных мероприятий таким образом, чтобы экологический эффект оказался максимальным.

Предложенный автором метод интегральной оценки качества окружающей среды позволяет получать сопоставимые балльные оценки для каждого из семи параметров [1]. При этом приращение величины оценки на Δa считается одинаково полезным для улучшения качества для всех исследуемых сред, но, очевидно, имеет различную финансовую стоимость, обусловленную проведением соответствующих природоохранных мероприятий.

Стоимость изменения величин рассчитывается исходя из конкретных природоохранных мероприятий и выражается, например, в условных единицах. Для некоторых параметров, например, таких как уровень электромагнитных излучений, она может определяться экспертным путём.

2. Модификация классического ГА

Для решения поставленной задачи воспользуемся модификацией классического ГА – генетическим микроалгоритмом. Он подразделяется на шесть шагов:

1. Сформировать популяцию с числом особей, равным восьми. Можно либо случайным образом выбрать все восемь хромосом, либо сохранить одну «хорошую» хромосому, полученную на предыдущих итерациях, и случайным образом «добрать» семь остальных хромосом.

2. Рассчитать значение функции приспособленности хромосом в популяции и выбрать лучшую хромосому. Обозначить её номером 8 и перенести в следующее поколение (элитарная стратегия).

3. Выбрать для репродукции остальные семь хромосом на основе детерминированного метода турнирной селекции (наилучшая хромосома также участвует в соревновании за право включения её копии в родительский пул). В ходе турнирной селекции хромосомы группируются случайным образом, при этом соседствующие пары соперничают за оставшиеся места. Следует обращать внимание на то, чтобы родительская пара не составлялась из двух копий одной и той же хромосомы.

4. Выполнить скрещивание с вероятностью 1, вероятность мутации принять равной 0.

5. Проверить сходимость алгоритма (с использованием соответствующей меры сходимости генотипов или фенотипов). В случае обнаружения сходимости вернуться к шагу 1.

6. Перейти к шагу 2.

Далее разберём предложенный подход на конкретном примере.

В соответствии с изложенными выше шагами исходными данными для решения задачи оптимизации будут являться наборы чисел $(A_{j1}, B_{j1}; A_{j2}B_{j2}; \dots A_{j7}B_{j7})$, где j – номер зоны (подрайона); $A_{j1}-A_{j7}$ – показатели комплексной оценки атмосферного воздуха, почвенного покрова, водных ресурсов, лесных насаждений, уровень шума и вибрации, электромагнитных излучений и объёмов накопления отходов, рассчитанные на основании методики из главы 2; $B_{j1}-B_{j7}$ – стоимость приращения балльной оценки (улучшения качества на 1 балл) для перечисленных показателей.

Для решения задачи нахождения наиболее оптимального плана вложения средств в природоохранные мероприятия в качестве функции приспособленности будем использовать стоимость затрат.

Далее выполним алгоритм, изложенный выше, при этом предположим, что количество подрайонов равно, например, 256:

1. Сформировать популяцию с числом особей, равным восемь.

01001010011
11001010010
10011001010
00110110110
10101011001
10101111000
00111101101
10110011010

При этом каждая из восьми хромосом состоит из 11 генов, первые 8 из которых используются для кодирования номера подрайона, а оставшиеся 3 – для номера показателя в подрайоне.

2. Осуществляем элитную стратегию селекции, в результате которой одна хромосома с наименьшим значением функции приспособленности (минимизация природоохранных затрат) переходит в следующую популяцию.

01001010011	
11001010010	
10011001010	
00110110110	
10101011001	
10101111000	
00111101101	
10110011010	10110011010

3. Остальные семь хромосом выбираем на основе детерминированного метода турнирной селекции, в результате чего получаем родительскую популяцию.

01001010011	11001010010
11001010010	10011001010
10011001010	10011001010
00110110110	10101111000
10101011001	11001010010
10101111000	00111101101
00111101101	10110011010
10110011010	10110011010

4. Скрещивание с вероятностью 1 выполняем для каждой выбранной пары хромосом, определяя случайным образом точку скрещивания k (из диапазона 1–10). В результате скрещивания пары родительских хромосом получается сле-

Таблица 1. - Результаты моделирования работы генетического алгоритма

Число повторений ГА	10	20	50	100	200	300	400	500	1000	2000	3000	5000	10000
Суммарное количество итераций	42	118	271	555	1157	1696	2383	2949	5746	11329	16960	28598	56857
Среднее количество итераций	4,20	5,90	5,42	5,55	5,79	5,65	5,96	5,90	5,75	5,66	5,65	5,72	5,69

дующая пара потомков: 1) потомок, хромосома которого на позициях от 1 по k состоит из генов первого родителя, а на позициях от $k + 1$ до 11 – из генов второго родителя; 2) потомок, хромосома которого на позициях от 1 до k состоит из генов второго родителя, а на позициях от $k + 1$ до 11 – из генов первого родителя.

1	110_01010010	1 и 2	110_11001010
2	100_11001010	1 и 2	100_01010010
3	1001100_1010	3 и 7	1001100_1101
4	1_010111000	3 и 7	0011110_1010
5	110010100_10	4 и 6	1_011101101
6	0_011101101	4 и 6	0_010111000
7	0011110_1101	5 и 8	110010100_10
8	101100110_10	5 и 8	101100110_10

5. Проверяем результат – если хромосомы выродились и равны – переходим к шагу 1. Если выделенная сумма на природоохранные мероприятия больше или равна сумме затрат, на которые указывают хромосомы – получено решение – остановка алгоритма.

6. Перейти к шагу 2.

При таком подходе общее количество ген в хромосоме зависит от числа подрайонов. С учётом количества учитываемых показателей (семь) в работе алгоритма необходимо осуществлять контроль трёх последних генов

на не равенство нулю (при формировании популяции и скрещивании).

Таким образом, в результате работы генетического алгоритма будет найден перечень подрайонов и показателей, по которым стоимость осуществления природоохранных мероприятий будет минимальна – то есть решена оптимизационная задача минимизации.

3. Моделирование предложенного метода

Моделирование данного метода показало, что в среднем за 4–6 итераций ГА по описанному методу приходит к оптимальному решению. Для получения достоверных результатов алгоритм запускался на серию повторений на случайно сгенерированной в каждом новом случае матрице исходных данных. В таблице 1 представлены полученные данные.

Как видно из таблицы 1 при увеличении количества повторных запусков ГА среднее количество итераций, за которое алгоритм находит оптимальное решение, колеблется в районе 5,7. При этом для единичных запусков результат может даже быть меньше 5.

Для исследования влияния размера популяции на точность получаемого результата были выполнены расчёты, отражающие процент отклонения найденного ГА оптимума от действительного минимума (рисунок 1).



Рисунок 1. - Зависимость точности результата от размера популяции

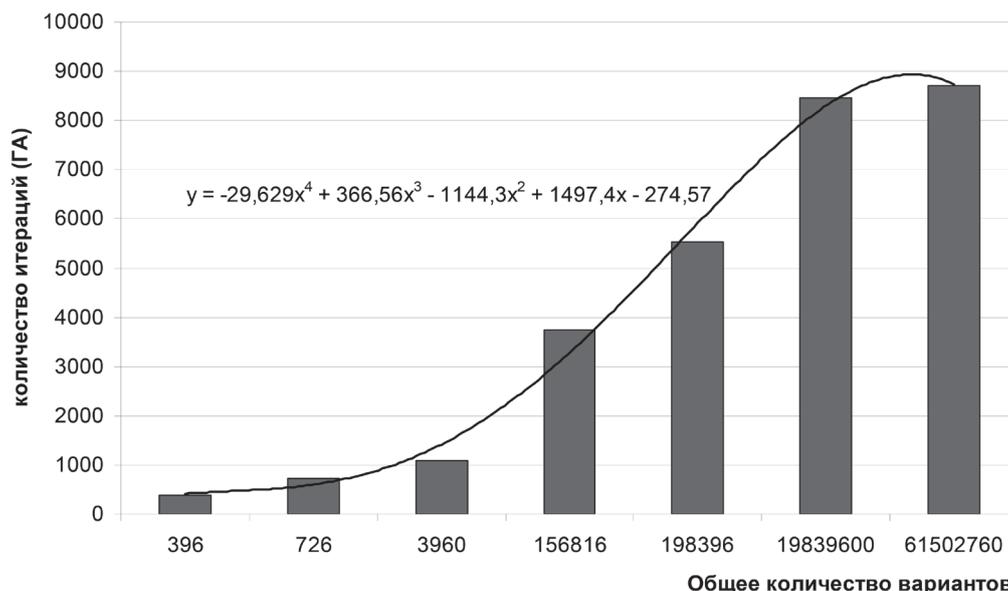


Рисунок 2. - График эффективности применения ГА

Как видно из рисунка 1 при размере начальной популяции 8 хромосом получаемый ГА результат отличается от реального минимума на 43,3%. При увеличении размера популяции точность возрастает, и при количестве хромосом 64 и более погрешность снижается до 4,7% и продолжает уменьшаться.

Также при увеличении размера популяции возрастает количество итераций, за которое ГА находит решение, и для 20 хромосом требуется в среднем 10,5 шагов; для 40–16,2; для 60–20,3; для 80–23,5; для 100–28,3 при величине погрешности 3,8%; для 150–34,2; 2,4%; для 200–39,7; 2,2%; для 300–56,6; 1,5%; для 500–94,2; 1,0% соответственно.

Для оценки эффективности использования ГА в оптимизационных задачах управления качеством ОС воспользуемся программой MetaTrader, которая позволяет, в том числе, сравнить количество итераций при многокритериальном выборе.

Использование встроенных в Тестер данной программы ГА позволило подтвердить ранее высказанное предположение о том, что с увеличением количества обрабатываемых параметров эффективность использования ГА возрастает. Так, для количества итераций менее 1000 применение ГА не даёт преимущества по сравнению с алгоритмами прямого поиска (полного перебора), но при возрастании пространства поиска выигрыш становится существенным и, например, для 61 млн. вариан-

тов оптимальное решение находится менее чем за 9000 итераций ГА (рисунок 2).

На рисунке 2 аппроксимация выполнена полиномиальной функцией 4-ой степени, что позволило получить наибольшую (по сравнению с линейной, логарифмической, экспоненциальной и степенной) величину достоверности – $R^2 = 0,9935$.

В настоящее время нет общепринятых подходов к количественной оценке эффективности применения генетических алгоритмов. В работе [2], например, эффективность показана как возможность получить более одного решения системы уравнений. Было показано, что генетический алгоритм в роли инструмента решения системы уравнений способен найти все ответы. Стандартные численные методы всегда выдают решение для конкретной системы линейных уравнений, но ГА способен находить больше, чем один набор решений для конкретных систем уравнений. Например, описан случай, когда в ходе экспериментов с ГА были получены три набора подходящих решений. При этом делается вывод, что ГА являются более эффективным методом по сравнению с традиционными методами (включая метод Гаусса) [2].

В другой работе [3] генетические алгоритмы рассматриваются как эффективный способ решить многие NP-трудные проблемы. В этой статье генетические алгоритмы были использованы для решения: TSP 0/1- задачи, о рюкзака-

ке, Шуберт функции и системы линейных уравнений. Мутация является одним из важных операторов генетических алгоритмов, поскольку тип мутации часто имеет большое влияние на результаты. Научное исследование показывает, что вставка мутации лучше подходит для TSP; граничные и неоднородные мутации лучше всего использовать для функций Шуберта и системы линейных уравнений, но для задачи о рюкзаке все виды использованных мутаций дали схожий результат. Для последующих исследований представляет научный интерес попытаться и другие NP проблемы решать с помощью генетических алгоритмов, при этом новые мутации могут быть получены путем объединения двух или более типов операторов мутации [3].

С точки зрения времени и отклонения в работе [4] использование ГА также считается эффективным. В этой статье предлагается эффективные ГА для HFS проблемы планирования с целью минимизации машинного времени. Рассматриваемая проблема является NP-проблемой. Большинство исследований для решения этой проблемы используют приближенные, а не точные методы, которые гарантируют оптимальное решение. Описаны рассчитанные процентные отклонения от нижних границ, результаты сравниваются с другими исследованиями по той же проблеме. Получено лучшее решение с предложенным ГА. Среднее отклонение ГА 1.50%, а средние отклонения AIS и V&V 1.657% и 3,6%, соответственно. Также можно видеть, что время работы центрального процессора при использовании ГА намного меньше, чем AIS и V&V. Предлагаемый ГА является хорошим инструментом для решения проблемы планирования и может быть использован для других промышленных задач [4].

Хотя выводы авторов убедительны, мы считаем, что метод, основанный на времени работы центрального процессора, не верен, так как он существенно зависит от производительности аппаратного обеспечения.

Проблема оптимизации ОС, схожа с задачей оптимального портфеля, которая решается в работе [5]. В выводах заявляется, что средняя вариативность широко используется в области финансов, чтобы справиться с проблемой выбора портфеля. Цель подхода состоит

в том, чтобы определить период оптимального вложения в каждый актив, основанный на скорости обратной секвенции. Генетический алгоритм предназначен для решения соответствующих задач оптимизации, потому что эти проблемы максимизации представлены с определенной структурой и не могут быть эффективно решены с помощью существующих традиционных методов оптимизации. В этой работе представлена задача формирования оптимального финансового портфеля. Авторы представили два подхода, и применили их для тестовой задачи. В результате эксперимента, предложенный метод признан действенным для задачи оптимизации портфеля [5]. К сожалению, в этой работе также нет определения эффективности использования ГА.

В работе [6] обсуждается проблема эффективного использования ГА в другой области. В этой статье описан способ с использованием генетических алгоритмов в области информационного поиска и, в частности, как ГА могут быть использованы для адаптации используемых совпадающих функций. Этот алгоритм был протестирован на коллекции документов Cranfield и результаты выглядят многообещающими. Авторы видят необходимость проводить больше исследований в этой перспективной области [6].

Таким образом, анализ не выявил общий подход к оценке эффективности использования ГА. Тем не менее, мы предлагаем свой подход, основанный на сравнении количества итераций.

Для промоделированного выше примера, в котором для 256 зон задаются для семи параметров семь значений стоимости улучшения на 1 балл, в случае использования любого алгоритма упорядочивания массива потребовалось бы 1792 (256*7) итераций для нахождения минимума. Генетический алгоритм получает решение после 28,3 итераций с погрешностью 3,8%, за 39,7 итераций с погрешностью 2,2%. Погрешность 1,0% достигается при среднем количестве шагов равном 94,2. Таким образом, ГА с погрешностью 3,8% в 63,3 раза, и с погрешностью 1,0% – в 19,0 раз эффективнее алгоритмов сортировки (нахождения минимума).

В заключение необходимо также отметить, что генетические алгоритмы не только эффективно решают оптимизационные задачи NP-

класса, но и позволяют выбирать оптимальные структуры иерархических нейронных сетей, используемых в сложных системах управления.

В теории алгоритмов классом NP (от англ. non-deterministic polynomial) называют множество алгоритмов, время работы которых сильно зависит от размера входных данных, но если предоставить алгоритму некоторые дополнительные сведения (так называемых свидетелей решения), то он сможет достаточно быстро (за время, не превосходящее многочлена от размера данных) решить задачу. Проблема в том, что найти таких свидетелей бывает сложно, поэтому многие алгоритмы из класса NP считаются долгими.

Заключение

Таким образом, научно-методический подход к информационному управлению качеством окружающей среды урбанизированных территорий с использованием генетических алгоритмов заключается в поиске наиболее оптимальных природоохранных решений на основании показателей качества ОС по семи

предложенным в работе компонентам (атмосферный воздух, почвенный покров, водные ресурсы, зелёные насаждения, уровень шума и вибраций, радиационное загрязнение, объёмы накопления отходов) и стоимости их приращения. При этом под оптимизацией качества ОС подразумевается достижение желаемого компромисса между объёмом средств, выделяемых на природоохранные мероприятия, и уровнем загрязнения природных компонент.

Важно отметить, что ни сами генетические алгоритмы как таковые, ни их параметры не являются новизной в данной работе. Принципиально новыми представляются теоретические основы и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в социально-экологических системах, которые показывают, какую информацию необходимо взять, как её обработать и представить, чтобы лицо, принимающее решение, могло применять существующие ГА для эффективного решения задач в области охраны окружающей среды. Именно в этом заключается новизна предложенных подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рыбак, В. А.** Антропогенная нагрузка на окружающую среду: количественная оценка, анализ, нормирование: монография / В. А. Рыбак.- Минск.: РИВШ, 2010.- 334 с.
2. **Ikotun, A. M.** The effectiveness of genetic algorithm in solving simultaneous equations / A. M. Ikotun, N. O. Lawal, P. A. Adelokun // International journal of computer applications.- V.14- № 8, February 2011, 38–41 p.
3. **Basima, H.** Evaluating the effectiveness of mutation operators on the behavior of genetic algorithms to non-deterministic polynomial problems / Hani F. Hasan Basima, Saleh M. Saleh Moutaz // Informatica.- № 35 (2011), 513–518 p.
4. **Cengiz, K.** An application of effective genetic algorithms for solving hybrid flow shop scheduling problems / Kahraman Cengiz and comp. // International journal of computational intelligence system, Vol. 1, № 2 (May, 2008), 134–147 p.
5. **Chi-Ming, L.** An effective decision-based genetic algorithm approach to multiobjective portfolio optimization problem / Lin Chi-Ming, Gen Mitsuo // Applied mathematical sciences, Vol. 1, 2007, № 5, 201–210 p.
6. **Praveen, P.** Effective information retrieval using genetic algorithms based matching functions adaptation / Pathak Praveen, Gordon Michael, Fan Weiguo // Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences – 2000.

Поступила 12.05.15

Riback V.

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS FOR SOLVING OPTIMIZATION PROBLEMS OF ENVIRONMENTAL QUALITY.

This article describes the author's method of genetic algorithms for solving optimization problems of environmental quality. The initial data are the numerical evaluation of the quality of each of the studied natural components on a dedicated subarea. Taking into account the ambient air; soil cover; water resources, green spaces, noise and vibration, levels of electromagnetic radiation and the volume of waste.

Правила для авторов

1. Общие требования

Материалы статей представляются на бумажном носителе (в двух экз.) по адресу: 220013, Минск, ул. Ф. Скорины, 25/3, корп. 20, каб. 508 (Петренко Юрий Николаевич) и в электронном виде e-mail: CA_PI@bntu.by. Телефон для справок: (017) 266 26 58.

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, домашний адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются. При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

Редакция не принимает статьи, опубликованные ранее в других журналах или научных изданиях.

Гонорар автору за публикацию статьи не выплачивается. Материалы, присланные в редакцию, авторам не возвращаются.

2. Правила оформления статей

Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

- для оригинальной статьи – 7 страниц (не более 8 иллюстраций);
- для краткого сообщения – 3 страницы (не более 2 иллюстраций).

Статья должна быть набрана с помощью текстового редактора Microsoft Word 2007.

Параметры страницы: формат А4 (высота 29,7 см., ширина – 21 см.); отступ для левого поля и поля сверху – 25 мм, правого и нижнего – 20 мм; нумерация страниц сверху в колонтитуле, со второй страницы, с выравниванием по правому краю.

Текст набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 12 мм.

2. Индекс УДК набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по правому краю.

3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

4. Название статьи набирается шрифтом Arial, 12 пт, жирный, все прописные, выравнивание – по центру.

5. Полное название организации (организаций), в которой работает автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру. После названия организации пропускается две строки.

6. Аннотация на языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, курсив, выравнивается по центру. Объем аннотации не более 8 строк, межстрочный интервал 1,15.

После аннотации пропускается одна строка.

7. Текст статьи (набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, с абзацем, выравнивание – по ширине) должен содержать следующие элементы:

1) введение (может содержать: краткий обзор литературы по проблеме исследования, перечисление нерешенных ранее вопросов, постановку проблемы, цель исследований). Слово «Введение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2) основная часть исследования (возможно деление на подразделы), включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии), при этом таблицы и рисунки не должны дублировать друг друга. Название каждого подраздела статьи печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

3) Заключение (формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ по сравнению с аналогами). Слово «Заключение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

8. Литература. Список литературы оформляется шрифтом TimesNewRoman, 12 пт в соответствии с Инструкцией по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением президиума Государственного высшего аттестационного комитета Республики Беларусь 24.12.1997 № 178 (в редакции постановления ВАК Беларуси от 22.02.2006 № 2). www.edu.grsu.by/files/liter.doc.

Слово «Литература» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по левому краю.

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]). В обзорных статьях указывается не более 15 источников, во всех других – не более 7–10.

9. К статье на русском (англ.) языке должна прилагаться аннотация на английском (русском) языке. Она должна содержать: Название статьи, фамилию и инициалы автора (авторов), краткое содержание статьи не более 8 строк.

10. Оформление формул. Только сложные формулы должны быть набраны с помощью встроенного в MS Word редактора формул Equation. Просто буквы с индексами могут быть набраны без использования формульного редактора с помощью средств оформления MS Word. Латинские символы должны быть набраны курсивом, как в формулах, так и на рисунках, и в тексте, а русские и греческие – обычным текстом.

В редакторе формул должен быть установлен следующий размер символов: обычный символ – 11 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 17 пт., мелкий символ – 12 пт. Формулы выравниваются по центру страницы. При необходимости делать ссылки на формулы их следует нумеровать арабскими цифрами, помещенными в круглые скобки, в порядке упоминания. Номера формул выравниваются по правому краю страницы.