

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА
№ 1, 2020**

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE
No 1, 2020**



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Сергей Васильевич Харитончик

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботко, В. Б. Байбурин (РФ),
Д. Ю. Большаков (РФ), Л. С. Герасимович, Н. Н. Гурский,
Ю. М. Захарик, И. А. Каляев (РФ), Г. О. Кипиани (Грузия),
Э. Г. Лазаревич, В. А. Липницкий, А. А. Лобатый,
Е. И. Никифорович (Украина), А. А. Прихожий,
И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов,
П. П. Урбанович, А. Патрин (Польша),
Ю. Н. Петренко (ответственный секретарь),
Н. Н. Ташатов (Казахстан), А. В. Чигарев, Д. К. Щеглов (РФ)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, V. Baiburin (RF), D. Bolshakov (RF),
N. Gurskiy, L. Gerasimovich, J. Zaharik, I. Kalyaev,
G. Kipiani (Georgia), E. Lazarevich, V. Lipnitsky, A. Lobaty,
E. Nikiforovich (Ukraine), A. Prihozhy, I. Satikov,
V. Starovoytov, P. Urbanovich, A. Patrin (Poland),
Y. Petrenko (executive secretary), N. Tashcatov
(Kazakhstan), A. Chigarev, D. Shcheglov (RF)

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований".

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)
- ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
- ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань
- ❖ DOAJ <https://doaj.org/toc/2414-0481>
- ❖ Google Scholar
- ❖ Киберленинка

- ❖ EBSCO
- ❖ BASE Search
- ❖ OpenAIRE
- ❖ WorldCat
- ❖ OpenDOAR
- ❖ ROAR

Содержание

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

Лопухов А. В., Бабченко А. А.

Способ повышения эффективности наведения беспилотного летательного аппарата на высокоскоростные и высокоманевренные цели4

Юденков В. С., Сулим П. Е.

Исследование влияния параметров бумаги на качество ризографической печати.....11

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И
ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

Вишняков В. А.

Организация интернет маркетинга с использованием интеллектуальных и блокчейн технологий18

Лобатый А. А., Бумай А. Ю.

Особенности построения алгоритмов оценивания параметров многомерных случайных процессов.24

Contents

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

Lopuhov A. V., Babchenok A. A.

Method for increasing the efficiency of guidance of an unmanned aerial vehicle at high speed and highly maneuverable targets4

Yudenkov V. S., Sulim P. Y.

Study of the influence of paper parameters on quality rizographic printing..... 11

**DATA PROCESSING AND
DECISION-MAKING**

Vishniakou U. A.

Internet marketing organization with the use of intelligent and block chain technologies18

Lobaty A. A., Bumai A. Y.

Features of construction of evaluation algorithms multidimensional random processes24

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ**Липницкий В. А., Семёнов С. И.**

Синдромные спектры орбит ошибок в РС-кодах ...34

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ****Лойко А. И.**Системы междисциплинарного структурного анализа
в области технологий искусственного интеллекта ...40**Попова Ю. Б., Легчилин И. В.**

Адаптивное мобильное приложение обучающей системы CATS45

INFORMATION SECURITY**Lipnitski V. A., Semyonov S. I.**

Syndrome spectrums of error orbits in RS-codes34

**INFORMATION
TECHNOLOGIES IN
EDUCATION****Loiko A. I.**Interdisciplinary structure analysis systems in the field
of artificial intelligence technologies40**Popova Y. B., Lehchylin I. V.**Adaptive mobile application for the CATS learning
system.....45**Ответственный секретарь редакции**

Петренко Ю. Н.

Технический редактор

Хвитько Е.А.

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**

Y. Petrenko

Technical Editor

E. Khvitsko

Editorial board address25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.byСвидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540
от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 25.03.2020. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 9,30. Уч.-изд. л. 3,64. Тираж 100 экз. Заказ 960.

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

© Белорусский национальный технический университет

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

УДК 623.462.22

А. В. ЛОПУХОВ, А. А. БАБЧЕНОК

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ И ВЫСОКОМАНЕВРЕННЫЕ ЦЕЛИ

Военная академия Республики Беларусь

Целью статьи является повышение эффективности применения беспилотного летательного аппарата (БЛА) при наведении его на высокоскоростные и высокоманевренные цели, за счет применения комбинированного способа создания управляющих сил и моментов, а также синтеза бортовой системы стабилизации БЛА, на основе многомерной нелинейной динамической модели.

Алгоритм комбинированного управления основан на сочетании аэродинамического и газодинамического способов создания сил и моментов. При этом учитываются режимы переключения с аэро- на газодинамическое управление, с учетом особенностей синтеза системы стабилизации на основе синергетической теории управления и процессов её динамики.

Проведено имитационное математическое моделирование БЛА с комбинированным способом управления и синтезированным регулятором. Синтез регулятора основан на введении в пространство состояний аттракторов, обеспечивающих формирование необходимых свойств БЛА. Синтезированный регулятор реализует требуемые технологические задачи и устойчивость летательного аппарата в процессе его наведения на цель.

Необходимость применения аэрогазодинамического способа управления и синтеза регулятора системы стабилизации обусловлена ростом тактико-технических характеристик средств воздушного нападения, что в конечном итоге позволит обеспечить высокую эффективность применения БЛА по высокоскоростным и высокоманевренным целям.

Ключевые слова: синтез регулятора, беспилотный летательный аппарат, управление, управляющие силы.

Введение

Научным коллективом одной из кафедр Таганрогского радиотехнического университета, возглавляемого профессором А. А. Колесниковым, в 1989–2011 гг. был разработан новый подход к аналитическому конструированию оптимальных регуляторов для нелинейных многомерных многосвязных систем высокой размерности. Данный подход отличается тем, что для аналитического конструирования используется не совокупность частных критериев качества, по каждому из которых синтезируемая система оптимальна в строго ограниченной области пространства состояний, а единый обобщенный оптимизирующий функционал [1], который может быть в той или иной мере только сходен с частным критерием качества в соответствующей нечетко определенной области пространства состояний. Указанный функционал может постепенно и без скачков

(асимптотически) приближаться к конкретному критерию качества, обеспечивая заданные характеристики переходных процессов в замкнутой системе, что позволяет синтезировать в замкнутой аналитической форме законы управления (регуляторы) объектов, описываемых нелинейными системами уравнений высокой размерности с учетом функциональных связей. Рассматриваемый подход, обладая значительной эвристической силой, имеет высокую степень адаптации к практическим инженерным задачам, позволяя разработчику на стадии проектирования системы осуществлять выбор оптимизирующего функционала с последующей коррекцией его структуры или параметров для получения желаемых динамических свойств (например, по результатам моделирования) замкнутой системы. Это связано с тем, что проблема многокритериальной оптимизации, как правило, не может быть реше-

на полностью формальными методами векторной оптимизации [1].

Постоянный рост тактико-технических характеристик средств воздушного нападения (значительное расширение диапазона высот, скоростей, дальностей и маневренных возможностей) требует синтезировать новые подходы к управлению беспилотными летательными аппаратами.

Наведение БЛА на средства воздушного нападения в большинстве своем зависят от маневренных свойств объекта управления. Комбинированный способ создания управляющих сил и моментов позволяет достичь свойства сверхманевренности БЛА, а также управлять на больших высотах, где аэродинамические органы управления (рули) являются малоэффективными.

Управление полётом БЛА, как и управление, любым другим сложным динамическим объектом, является сложно организованным и структурированным процессом. Полет объекта управления зависит от огромного количества разнообразных факторов [2]. Постановку задачи управления можно подразделить на следующие составляющие:

во-первых – задача наведения, которая определяет траекторию движения центра масс БЛА;

во-вторых – задача стабилизации или ориентации, которая определяет движения БЛА относительно центра масс.

Одним из подходов повышения эффективности наведения БЛА на высокоскоростные и высокоманевренные цели является применение синергетической теории управления (СТУ) [1]. Применение рассматриваемой теории совместно с комбинированным способом создания управляющих сил и моментов позволяет проводить синтез для стационарных нелинейных моделей, что обеспечит требуемую эффективность наведения БЛА.

Основная часть

Синергетический эффект (повышение эффективности деятельности в результате интеграции) будет достигаться посредством применения аэрогазодинамического (комбинированного) способа создания сил и моментов, а также синтеза регулятора для бортовой системы стабилизации БЛА на основе полной нелиней-

ной математической модели пространственного движения объекта управления.

Большинство БЛА используют классический аэродинамический способ создания управляющих сил и моментов [3]. Однако управление БЛА на начальном и конечном участке с помощью аэродинамических рулей является трудным и малоэффективным, что в результате сказывается на эффективности его наведения (использование аэродинамического способа эффективно только на средних высотах и дальностях).

Для обеспечения эффективного наведения на высокоскоростные и высокоманевренные цели необходимо использовать комбинированный (аэрогазодинамический) способ создания управляющих сил и моментов. Максимальная точность наведения на конечном участке «БЛА-цель» достигается посредством применения комбинированного способа создания управляющих сил и моментов (свойств сверхманевренности), когда время реакции БЛА или время выхода на требуемую перегрузку минимальны, а уровень поперечных перегрузок на больших высотах выше, чем с использованием аэродинамического способа управления.

Бортовая система стабилизации, построенная по принципам комбинированного способа создания управляющих сил и моментов, основывается на применении как аэродинамического, так и газодинамического канала. Структурная схема системы стабилизации представлена на рис. 1, и включает в свой состав обратные связи по ускорению с коэффициентами усиления, датчик угловых скоростей (ДУС) и датчик линейный ускорений (ДЛУ), коэффициенты угловой скорости и необходимые передаточные функции. Схема «утка» используется при аэродинамической компоновке БЛА [2].

Способ комбинированного управления основывается на включении двигателя, который ориентируется на резкое изменение положения центра масс цели. Управляющим параметром является момент включения и время действия импульсной двигательной установки. Реализация комбинированного способа осуществляется путем создания порогового устройства, представленного на рис. 2, который выполняет функцию включения (переключения) аэро- или газодинамического канала [3].

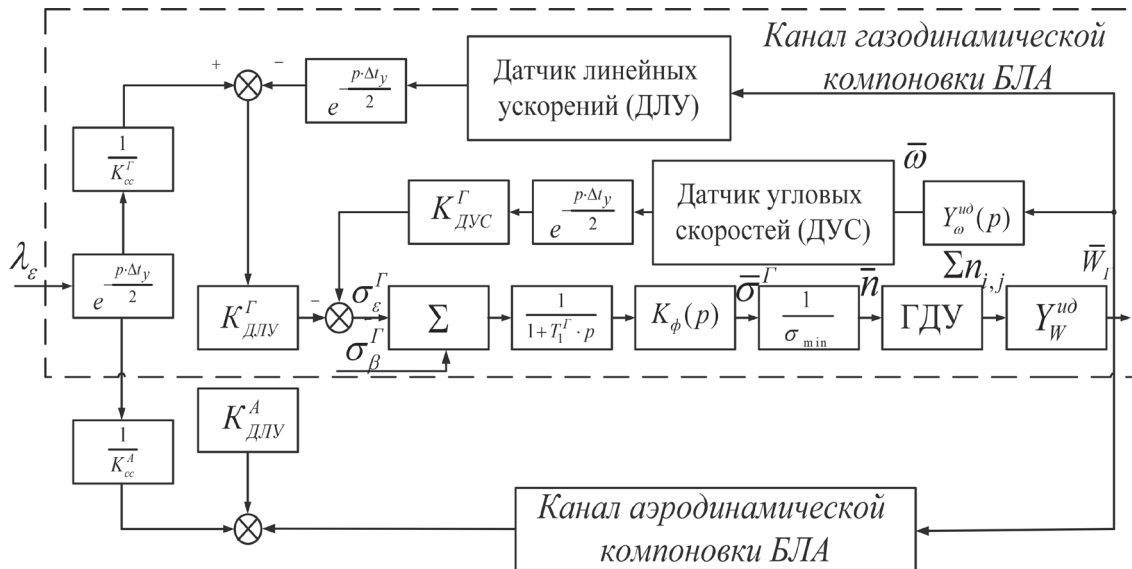


Рис. 1. Структурная схема аэрогазодинамического способа создания управляющих сил и моментов

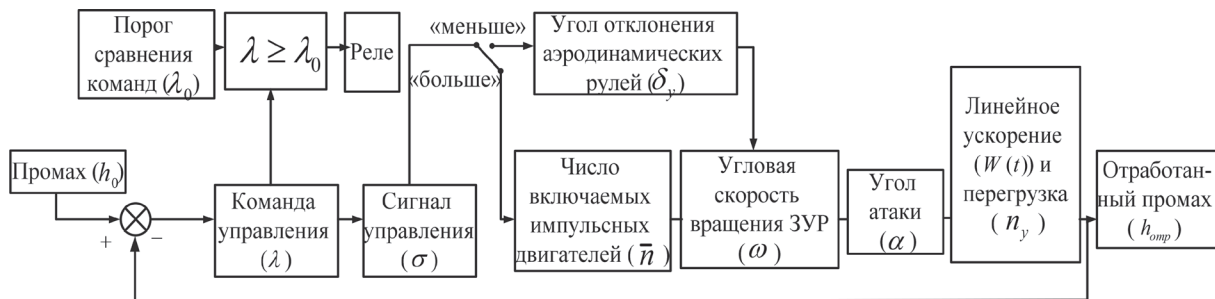


Рис. 2. Двухканальная система комбинированного управления БЛА (режимный переключатель) и принцип её работы

Режимный переключатель работает по двум принципам: если порог превышает («больше») – включается газодинамический канал, если «меньше» – включается аэродинамический канал. Включение импульсного двигателя производится в определенный момент, когда угловая скорость визирования достигнет критического или порогового значения [3]. Для устранения ошибки, обусловленной начальными условиями, необходимо сформировать требуемую перегрузку за минимальный промежуток времени. Также стоит отметить, что на этапе поддержания необходимого угла атаки работает аэродинамический канал.

БЛА с комбинированным способом управления достигает свойств сверхманевренности на «финишной» фазе перехвата и способна обеспечить минимальную ошибку наведения, что приводит к повышению вероятности точного наведения на цель, тем самым обеспечивается решение первой задачи – наведение, которая предназначена для определения траекторий движения центра масс БЛА.

Синтез алгоритма управления газодинамического устройства

Математическое представление суммарного вектора сигнала управления:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_\varepsilon^\Gamma + \bar{\sigma}_\beta^\Gamma \quad (1)$$

При этом сигналы управления равны:

$$\sigma_\varepsilon^\Gamma = \left(\frac{\lambda_\varepsilon}{K_{\text{ст}}^\Gamma} + \sigma_{\text{длу}}^\Gamma \right) K_{\text{длу}}^\Gamma + K_{\text{дус}}^\Gamma \sigma_{\text{дус}}^\Gamma,$$

$$\sigma_\beta^\Gamma = \left(\frac{\lambda_\beta}{K_{\text{ст}}^\Gamma} + \sigma_{\text{длу}}^\Gamma \right) K_{\text{длу}}^\Gamma + K_{\text{дус}}^\Gamma \sigma_{\text{дус}}^\Gamma,$$

где $\sigma_{\text{длу}}^\Gamma$, $\sigma_{\text{дус}}^\Gamma$ – сигналы цепей обратных связей по датчику линейного ускорения и датчику угловой скорости, соответственно.

Минимальный сигнал управления газодинамического устройства (ГДУ) имеет вид:

$$\sigma_{\text{min}} = |a_{3\text{газ}}| \tau_{\text{ед}} K_{\text{дус}}^\Gamma + \dot{\omega}_a L_{\text{гду}} K_{\text{длу}}^\Gamma, \quad (2)$$

где $a_{3\text{газ}} = \frac{P_1(\bar{x}_m - \bar{x}_{\text{газ}})L}{I_{z1}}$ – динамический коэффициент эффективности ГДУ; P_1 – сила,

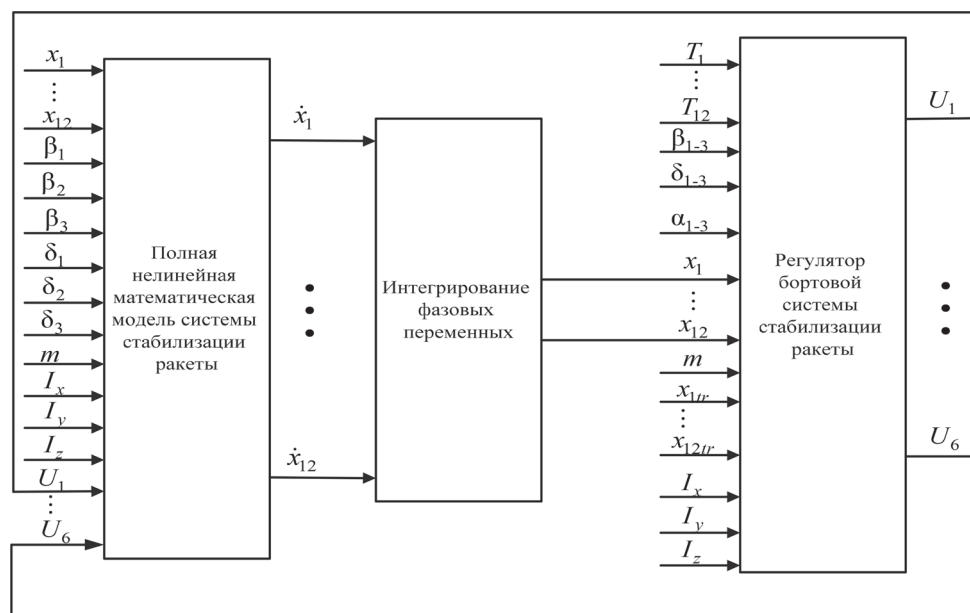


Рис. 3. Структура моделирования БЛА в пакете прикладных программ «Matlab»

создаваемая одним импульсным двигателем; $\bar{x}_M, \bar{x}_{ГДУ}$ – координаты центра масс и ГДУ, соответственно; L – длина летательного аппарата; I_{z1} – момент инерции по соответствующей оси связанной системе координат [3]; $\dot{\omega}_a$ – угловое ускорение (аэродинамическая сила); $L_{ГДУ}$ – координата установки датчика линейного ускорения; $\tau_{ед}$ – время работы единичного импульсного двигателя.

Количество импульсных двигателей определяются выражениями:

$$n_{\beta} = \frac{|\sigma_{\beta}^r|}{\sigma_{\min}}; n_{\varepsilon} = \frac{|\sigma_{\varepsilon}^r|}{\sigma_{\min}}; n_{1\Sigma} = n_{2\Sigma} = \sqrt{n_{\varepsilon}^2 + n_{\beta}^2}. \quad (3)$$

Управляющие силы с учетом (3) определяются как

$$F_{1\Sigma} = n_{1\Sigma} P_1 = \sqrt{n_{\varepsilon}^2 + n_{\beta}^2}, F_{2\Sigma} = n_{2\Sigma} P_1 = \sqrt{n_{\varepsilon}^2 + n_{\beta}^2}. \quad (4)$$

Математическая модель, представленная в виде структурной схемы на рис. 1 и расчеты управляющих и реактивных сил (1)–(4) обеспечивают работоспособность управления ГДУ и реализуется в виде программного обеспечения. Достоинствами использования ГДУ, являются:

высокая эффективность перегрузки при малых относительных аэродинамических скоростях;

слабая зависимость такой перегрузки от внешнего давления и скоростного напора;

независимость создания перегрузки от достоинств и недостатков аэродинамической схемы.

Недостатки ГДУ: более высокая сложность газодинамических систем управления; принципиально меньшая надежность и ограниченность ресурса управления.

Второй задачей является стабилизация БЛА в пространстве или его ориентация.

Синтез регулятора системы стабилизации БЛА основывается на математической модели пространственного движения с учетом динамики полета и влияния внешних и внутренних возмущающих факторов [3–5]. Структура модели представлена на рис. 3 [6]. Полная нелинейная математическая модель БЛА, включающая кинематические и динамические уравнения представлена в [4].

Синтез регулятора методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) основывается на введении последовательности инвариантных многообразий (ИМ), которые выступают в роли линии или точки (кинематическая траектория), путем оптимизации которых можно добиться желаемого поведения динамической системы, исходя из поставленных целей управления.

Задача синтеза – обеспечение требуемых динамических свойств замкнутой системы управления летательного аппарата, синтезируя при этом вектор управления, который обеспечит перевод объекта управления на некоторые ИМ, а затем непосредственно на аттрактор, т. е. цель.

Управление БЛА в СТУ представляет собой целенаправленный процесс редуцирова-

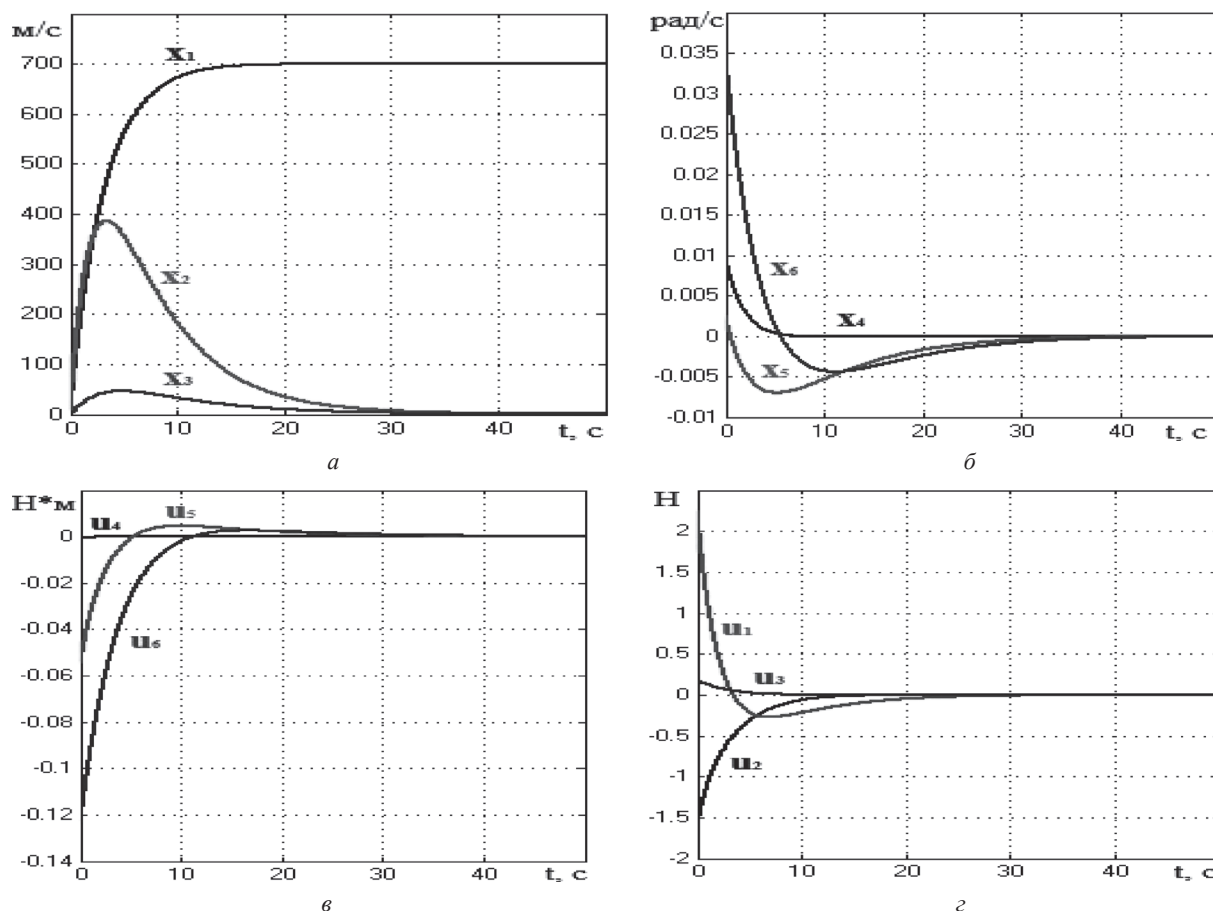


Рис. 4. Результаты моделирования регулятора бортовой системы стабилизации БЛА на основе СТУ: а – проекции вектора линейной скорости: продольной, вертикальной и боковой оси; б – проекции вектора угловой скорости: продольной, вертикальной и боковой оси; в, г – переходные процессы относительно внешних управлений

ния «избыточных» степеней свободы. Избыточными считаются те, которые, не предназначены для обеспечения заданных целей управления. В конце синтеза остаются только те степени свободы, которые определяют технологическую задачу управления БЛА.

$$J = \int_0^{\infty} \left(\sum_{s=1}^m [T_s^2 \dot{\Psi}_s^2(t) + \Psi_s^2(t)] \right) dt, \quad (5)$$

Критерий качества определяется исходя из цели функционирования БЛА:

где T_s – постоянные времени, которые влияют на качество динамики процессов в замкнутой системе «объект-автопилот»; Ψ_s – инвариантные многообразия.

На рис. 4 представлены графики изменения фазовых координат и сигналов управления, полученных в результате моделирования синтезированной системы.

Для оценки адекватности предложенного синтеза регулятора для бортовой системы стабилизации БЛА, было проведено моделирование

в пакете прикладных программ «Matlab» при следующих исходных данных синтезируемого регулятора (постоянных времени): $T_{1,2} = 4$ с, $T_3 = 3,5$ с, $T_4 = 2$ с, $T_{5,6} = 8$ с, $T_7 = 1$ с, $T_8 = 4$ с, $T_9 = 1,5$ с, $T_{10} = 4$ с, $T_{11} = 1$ с, $T_{12} = 3$ с.

На рис. 4, а проекция вектора линейной скорости (продольной) достигает желаемых значений [4] за минимальный промежуток времени, так как вертикальные и боковые оси с течением небольшого промежутка времени стремятся и достигает нулевой отметки.

На рис. 4, б проекции вектора угловых скоростей (продольной, вертикальной и боковой, соответственно) в полной мере описывают ориентацию БЛА в пространстве относительно центра масс, затухают и к 20 секунде достигают нуля и движется вдоль нее.

На рис. 4, в, г внешние управления, представленные в первых шести уравнениях полной нелинейной математической модели пространственного движения БЛА [2], заканчива-

ют свое действие при достижении необходимых величин и точно таким же образом стремятся к нулю, и движутся вдоль него.

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что за минимальный промежуток времени фазовые переменные достигают необходимых нам динамических характеристик БЛА, при этом обеспечивается:

максимальный учет их свойств;

система управления БЛА рассматривается без разбиения его на отдельные контуры управления;

инвариантность к внешним и внутренним возмущающим факторам;

требуемые перегрузки за минимальный промежуток времени и грубость к переходным процессам.

Рассмотренный выше метод синтеза отражает перспективность его использования. Аналитический синтез системы стабилизации БЛА с комбинированным способом создания управляющих сил и моментов, основанный на применении импульсной двигательной установки в газодинамическом канале (работающий в дискретном режиме [3]), показал работоспособность и актуальность его применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления. Инварианты, оптимизация, синтез / А. А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат; Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1994. – 344 с.
2. Кун, А. А. Основы построения систем управления ракетами / А. А. Кун, В. Ф. Лукьянов, С. А. Шабан. – М.: Изд. академии, 2016. – 232 с.
3. Проектирование зенитных управляемых ракет / И. С. Голубев [и др.]; под общ. ред. И. С. Голубева – М.: Издательство МАИ, 1999. – 728 с.
4. Колесников, А. А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза / А. А. Колесников. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 229 с.
5. Petkov, P. Hr. Robust Control Design with MATLAB / P. Hr. Petkov. – Barcelona, 2002. – 238 p.
6. Лопухов, А. В. Методика синтеза регулятора методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов для бортовой системы стабилизации зенитной управляемой ракеты / А. В. Лопухов, О. В. Сидорович // Сб. науч. статей Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2019. – № 37. – С. 58–65.

REFERENCES

1. Kolesnikov, A. A. Synergetic control theory. Invariants, optimization, synthesis / A. A. Kolesnikov. – M.: Energoatomizdat; Taganrog: Publishing house of TRTU, 1994. 344 p.
2. Kuhn, A. A. Fundamentals of building rocket control systems / A. A. Kuhn, V. F. Lukyanov, S. A. Shaban. – M.: Publishing House. Academy, 2016. 232 p.
3. Designing anti-aircraft guided missiles / I. S. Golubeva [et al.]; under the general. ed. I. S. Golubeva – M.: Publisher MAI, 1999. – 728 p.
4. Kolesnikov, A. A. Synergetic management methods for complex systems: theory of system synthesis / A. A. Kolesnikov. – M.: URSS editorial, 2005. 229 p.
5. Petkov, P. Hr. Robust Control Design with MATLAB / P. Hr. Petkov. – Barcelona, 2002. – 238 p.
6. Lopukhov, A. V. Regulator synthesis technique by the method of analytical design of aggregated regulators for an onboard stabilization system of an anti-aircraft guided missile / A. V. Lopukhov, O. V. Sidorovich // Sat. scientific Articles Military. Acad. Rep. Belarus. – 2019. – No. 37. – S. 58–65.

Поступила
19.01.2020

После доработки
10.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

LOPUHOV A. V., BABCHENOK A. A.

METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GUIDANCE OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE AT HIGH SPEED AND HIGHLY MANEUVERABLE TARGETS

Military academy of the Republic of Belarus

The purpose of the article is to increase the efficiency of the use of an unmanned aerial vehicle (UAV), when pointing it at high-speed and highly maneuverable targets, through the use of a combined method of creating control forces and moments, as well as the synthesis of an onboard stabilization system (UAV), based on a multidimensional nonlinear dynamic model.

The combined control algorithm is based on a combination of aerodynamic and gas-dynamic methods of creating forces and moments. In this case, switching modes from aerodynamic to gas-dynamic control are taken into account, including the features of the synthesis of the stabilization system on the bases of the synergetic control theory and the processes of its dynamics.

Simulated mathematical modeling of UAVs with a combined control method and a synthesized controller was carried out. The synthesis of the onboard stabilization system controller is based on the introduction of attractor states into the space, which ensure the formation of the necessary UAV properties. The synthesized controller implements the required technological tasks and the stability of the aircraft.

The need to use the aerodynamic control method and synthesis of the stabilization system regulator is due to the growth of the tactical and technical characteristics of aerospace attack facilities, which will ensure high efficiency of UAV application for high-speed and highly maneuverable targets.

Keywords: controller synthesis, unmanned aerial vehicle, control, control forces.



Лопухов Андрей Викторович, магистр технических наук учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Lopuhov Andrey Victorovich, master of technical sciences educational establishment «Military academy of the Republic of Belarus».

E-mail: lopuhov.2017@mail.ru



Бабченок Александр Александрович, магистр технических наук учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Babchenok Aleksandr Aleksandrovich, master of technical educational establishment «Military academy of the Republic of Belarus».

E-mail: babcheynok.alex@gmail.com

УДК 004.932.4:681.6–33:655.3.063.2

В. С. ЮДЕНКОВ, П. Е. СУЛИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ БУМАГИ НА КАЧЕСТВО РИЗОГРАФИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Создание новых цифровых технологий, позволяющих автоматизировать воспроизведение текстовой и изобразительной информации, привело к созданию и разработке цифровой печати. Цифровая печать – это технология получения оттиска в печатающем устройстве на основе оригинала, созданного в виде соответствующих кодов с помощью компьютера. Одной из технологий цифровой печати является *computer-to-press* и одно из устройств этого направления – ризограф. Качество ризографической печати хуже, чем на офсете, текст печатается средней четкости, а изображения напоминают фотографии в старинных газетах и требуют специальной подготовки. Однако, ризограф – самое выгодное по стоимости решение для малых и средних тиражей – от 50 до 1000 листов. Широкое применение ризографической печати в типографиях требует повышения быстродействия оборудования с соблюдением качества печати цифровых изображений. Для повышения качества ризографической печати требуется создание методов по формированию исходных показателей оригинал-макета (четкость, корректность передачи полутонов, контрастность). При этом на итог получения качественных изображений, полученных при печати на ризографе, влияет микрогеометрия поверхности и физико-механические свойства бумаги. Так, оптическая плотность красочного слоя на оттиске в значительной степени определяется структурой участков бумаги, в частности, впитывающей способностью и пористостью. Для получения качественных изображений на оттисках требуется не только настроить сам оригинал-макет, но и подобрать бумагу с такими характеристиками, которые позволили получить наилучший результат при печати на ризографе. Так, как ризограф занимает промежуточное место по качеству между копировальной техникой и лазерной печатью, за эталон качества печати взят лазерный оттиск. И одной из задач качества ризографических оттисков является повышение их до качества лазерной печати.

Ключевые слова: бумага, качество печати, гибридное растривание, трафаретная печать, ризограф.

Введение

Печатная машина ризограф, работает по технологии «*computer-to-press*», сочетает в себе цифровой способ обработки информации и трафаретный способ нанесения краски на бумагу. Подключение компьютера к ризографу через плату интерфейса дает возможность получать оттиски на бумаге при поступлении цифровых данных. На качество ризографического оттиска, включающее показатели четкость, контрастность, зашумленность, корректность передачи полутоновых изображений, влияют следующие факторы: способ растривания и качество расходных материалов. Основой для печати информации, содержащие изображение типа: «текст», «график», «контурный рисунок» и «фото» является оригинал-макет. Перед отправкой на печать оригинал-макет с компьютера направляется в растровый процессор ризографа. В настройках штатного драйвера ризографа заложено два типа растров – периодический и непериодический, которые не всегда обеспечивают необходимый

уровень качества получаемых изображений. Поэтому для повышения качества изображений, рекомендуется дополнительно рассмотреть гибридный способ растривания. Предложенное нами гибридное растривание сочетает в себе одновременно периодический и непериодический способ растривания.

Также целесообразно для анализа качества получаемой печатной продукции рассмотреть влияние носителя печатных изображений – бумаги с использованием различных способов растривания.

Для получения печатной продукции на ризографе используется бумага: массой от 46 г/м² до 210 г/м², писчая (ГОСТ 18510-87), а также офсетная (ГОСТ 9094-89). Использование бумаги с различными свойствами требует дополнительного проведения исследований с целью определения оптимальных видов и сортов, которые позволяют получать качественные показатели изображений по четкости, контрастности, корректности передачи полутоновых изображений.



Рис. 1. Ризографический оттиск изображения типа «фото», полученный гибридным способом растривания



Рис. 3. Ризографический оттиск изображения типа «контурный рисунок», полученный периодическим способом растривания

Основная часть

Из ранее проведенных исследований [1–3] следует, что для печати изображения типа «фото» (рис. 1), и «графика» (рис. 2), целесообразно применять гибридный способ растривания, так как применение данного способа растривания позволяет получать мелкоструктурную детальную проработку изображений, и тем самым повышает его разрешающую способность. В то же время для изображения типа «контурный рисунок» – периодический (рис. 3), так как позволяет более полно отображать графическую информацию, а для изображения типа «текст» использовать непериодический способ растривания (рис. 4).

Для повышения качества ризографических оттисков по четкости, корректности передачи полутонов изображения следует обработать их линейными фильтрами: *laplассian*, *unsharp*, *sobel*, *prewitt*, а для подавления шумов на изображении нелинейными фильтрами *medfilter* и *admedian* (рис. 5). Это дает возможность

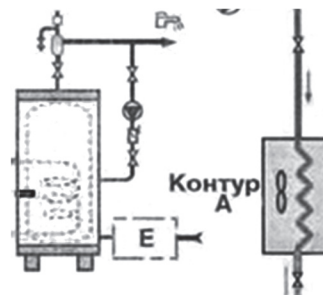
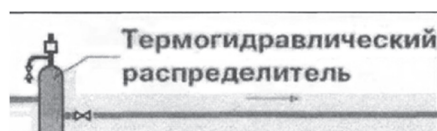


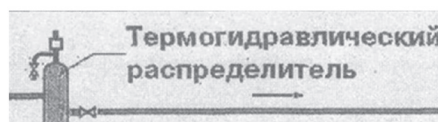
Рис. 2. Ризографический оттиск изображения типа «график», полученный гибридным способом растривания

ASTUMNB

Рис. 4. Ризографический оттиск изображения типа «текст», полученный непериодическим способом растривания



а



б

Рис. 5. Ризографические оттиски: а – без использования фильтрации, б – с использованием фильтра *admedian*

сформировать оригинал-макет таким образом, чтобы получать изображения с высокими показателями значений по четкости, корректности передачи полутоновых изображений.

Итогом получения печатного изображения является бумага. Показателями свойств бумаги для печати на ризографе являются: состав бумаги, размерно-весовые показатели, направление ориентации волокон, пористость, светонепроницаемость, белизна, что определяет качество получаемого печатного оттиска.

Целью данной работы является исследование влияния свойств бумаги на показатели контрастности, четкости и корректности передачи получаемых ризографических печатных оттисков. Исследования качества получаемых оттисков проводились при использовании шести сортов бумаги (таблица). Печать оттисков осуществлялась на ризографе марки EZ371. Измерения толщины образцов бумаги осуществляли с помощью толщинометра ТНБ-1-А (ISO 534, ГОСТ 27015-86). Для этого толщину

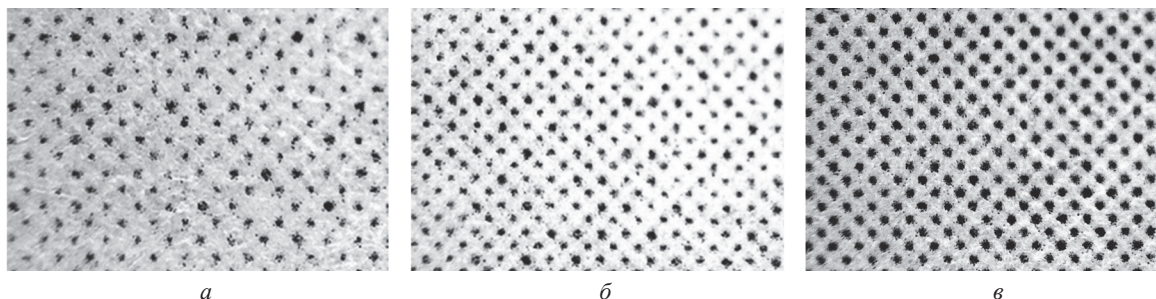


Рис. 6. Тестовое изображение лазерной печати с 700 кратным увеличением с плотностью заполнения: а – 10%; б – 20%; в – 30%

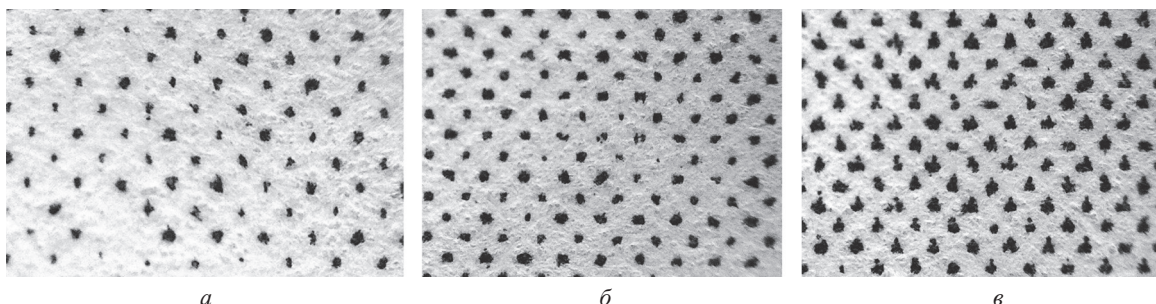


Рис. 7. Тестовое изображение, полученное на ризографе, с использованием периодического растривания с плотностью заполнения: а – 10%; б – 20%, в – 30%

образцов бумаги измеряли прибором в десяти точках образцов. Результатом измерения является среднее значение десяти измерений толщины образцов бумаги. Количество твердых веществ волокна, наполнителя в бумаге оценивается массой в 1 м². Данный параметр определялся взвешиванием вырезанного куска бумаги. Белизна бумаги измерялась с помощью фотометра КОЛИР. Шероховатость бумажных образцов определялось по методу Бендтсона, основанную на истечения потока воздушной массы в течении 1 мин. Степень проклейки бумаги определялось чернильно-штриховым методом.

Различные сорта бумаги и их характеристики

Свойства бумаги	Образец бумаги № 1	Образец бумаги № 2	Образец бумаги № 3	Образец бумаги № 4	Образец бумаги № 5	Образец бумаги № 6
Толщина, мм	102	146	81	91	80	170
Масса, г/м ²	80	120	65	75	50	195
Белизна, %	81,63	85,49	74,11	68,71	58,21	84,33
Шероховатость, мл/мин	344	320	117	176	175	14
Степень проклейки, мм	1,5	0	3	0	1,5	0

Для оценки качества получаемых ризографических оттисков на бумажном носителе нами разработана тестовая шкала, которая позволяет

оценить воспроизведения полутоновых изображений, разрешающую способность печатного оттиска с использованием кольцевых, радиальных и штриховых мир, а также текстовую размерность изображения от 2 до 24 пунктов.

Печать оттисков осуществлялась на бумаге с характеристиками, представленных в таблице. При этом при печати использовали штатные настройки драйвера с периодическим и непериодическим растриванием, а также применялось дополнительное предложенное нами гибридное растривание.

На рис. 6 представлено тестовое цифровое полутоновое изображение с различной плотностью запечатки при лазерной печати.

Далее была исследована печать тестового изображения с 10%, 20% и 30% плотностью запечатки на ризографе с использованием штатного драйвера и периодическим растриванием (рис.7).

При непериодическом растривании тестовое цифровое изображение с 10%, 20% и 30% плотностью заполнения преобразуется в набор кривых линий, состоящих из набора точек приблизительно одного размера (рис. 8).

В предложенном и разработанном гибридном методе растривании цифровое изображение преобразуется в растровые точки (рис. 9, а), расположенные в стохастическом порядке

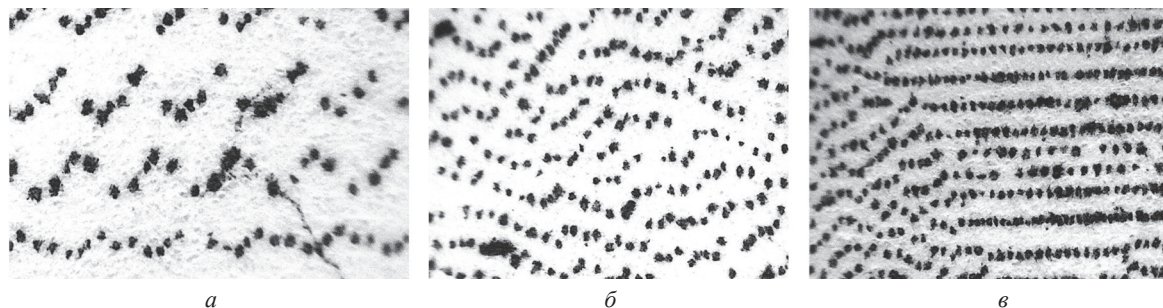


Рис. 8. Тестовое изображение, полученное на ризографе, с использованием неперидического растрирования с плотностью заполнения: а – 10%; б – 20%, в – 30%

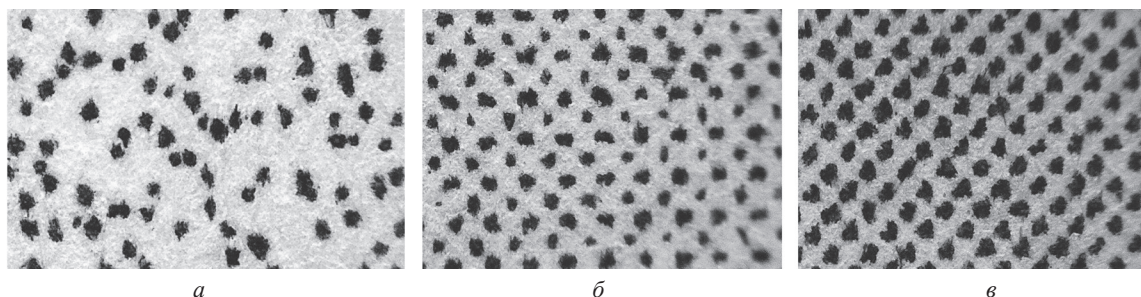


Рис. 9. Тестовое изображение, полученное на ризографе, с использованием гибридного растрирования с плотностью заполнения: а – 10%; б – 20%, в – 30%

с точками одного размера, и периодическом порядке (рис. 9, б, в).

При 30% плотности заполнения растровых точек и гибридном растрировании изображение имеет вид равномерного плотного запечатанного поля изображения (рис. 9, в) по сравнению с использованием штатных способов растрирования изображений (рис. 7, 8).

Также из анализа полученных изображений следует, что при печати на ризографе с использованием бумаг (таблица), оттиски с образцом № 5 (массой 50 г/м²) мялись, рвались, скручивались внутри ризографа. Качество печати было при этом низким. Оттиски с образцом бумаги № 2 (массой 120 г/м²), при печати на ризографе требовали регулировки зазора при подаче бумаг в печатную секцию. При этом данный вид бумаги идеально подходит для печати обложек для книг и буклетов в связи с высокой механической прочностью бумажного носителя. Качество получаемых печатных ризографических оттисков при этом высокое. Оттиски с образцом бумаги № 6 (массой 200 г/м²), имели низкое качество, так как, печатная краска не впитывалась в основу бумаги и осыпалась, и оставалась только на поверхности, и в дальнейшем приводило к размазыванию полиграфического оттиска. Наилучшими результатами качества печати обладают оттиски

с использованием образцом бумаги № 3 (массой 65 г/м²), № 4 (массой 75 г/м²) и № 1 (массой 80 г/м²). При этом образец бумаги № 3 лучше использовать для односторонней печати. В случаи двухсторонней запечатки краска проходит на обратную сторону листа за счет излишнего впитывания краски, что является существенным недостатком напечатанного изображения.

Равномерность распределения красочного слоя на поверхности бумажного носителя важное условие формирования изображения. Чем выше равномерность распределения красочного слоя по толщине, тем точнее передаются отдельные детали изображения. Такое качество печатных изображений получается лучше при гибридном растрировании (рис. 10) исходного оригинал-макета и при печати на образцах бумаги № 1 и № 2 с белизной 81,63% и 85,49%.

Анализ получаемых тестовых изображений при значениях кегля текста 14 пт. показывает, что получаемые изображения (рис. 10, а–в) по

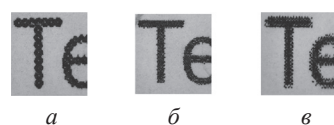


Рис. 10. Структура текстовых изображений при значении высоты текста 14 пт.: а – периодический; б – неперидический; в – гибридный способ растрирования

качеству отличаются. Наиболее высоким качеством изображение обладают текстовые изображения с использованием настроек штатного драйвера и применением непериодического способа растривания (рис. 10, б).

Заключение

Наиболее качественную печать изображений типа: «фото» и «график» обеспечивает гибридное растривание с использованием бумаги образца № 1, обладающий высокой шерохова-

тостью (344 мл/мин) и развитой структурой поверхности, которая объемно связывается с печатной краской и обеспечивает лучший контраст, четкость и корректность передачи полутоновых изображений. Менее целесообразным является для использования в ризографической печати образцов бумаги под № 3 и № 6, в связи с низкой шероховатостью бумажного листа, что не позволяет красочному слою скрепиться с поверхностью бумажного листа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сулим П., Юденков В. Повышение качества печати на ризографе на основе метода адаптивного скрининга // Печать дней будущего 2015: Материалы 6-й Международной научной конференции. Германия, 2015. С. 109–116.
2. Сулим П. Е., Юденков В. С. Использование программного обеспечения для спектрального анализа ризографической печати // Системный анализ и прикладная информатика. 2015. № 3. С. 42–46.
3. Сулим П. Е., Юденков В. С. Метод улучшения процесса растривания на ризографе EZ 371E на основе программно-гибридной технологии // Труды БГТУ. 2016. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 61–66.
4. Acharya T., Ajoy K. Ray Image Processing: Principles and Applications. New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2005. 428 p.
5. Яне, Б. Цифровая обработка изображений / Б. Яне; пер. с англ. А. М. Измайловой. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
6. Бумага для печати офсетная. Технические условия: ГОСТ 9094-89. Минск: Нац. книж. палата Беларуси, 1989. 12 с.
7. Бумага и картон. Метод определения белизны: ГОСТ 30113-94. Минск: Госстандарт, переиздание, 2010. 8 с.
8. Технология целлюлозно-бумажного производства. Т. II: Производство бумаги и картона. Ч. 2: Основные виды и свойства бумаги, картона, фибры и древесных плит. СПб.: Политехника, 2006. 499 с.
9. Методы и оборудование контроля качества полиграфических материалов: справочник для студентов специальностей 1–47 01 01 «Издательское дело», 1–47 02 01 «Технология полиграфических производств» / сост.: А. А. Губарев, М. А. Зильберглеит. – Минск: БГТУ, 2012. – 51 с.
10. Киппхан, Г. Энциклопедия по печатным средствам информации: пер. с нем М.: МГУП, 2003. – 1280 с.
11. Кузнецов, Ю. В. Технология обработки изобразительной информации / Ю. В. Кузнецов. – СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2002. – 312 с.
12. Федорова, И. Технология полиграфического производства. Технология допечатных процессов / И. Федорова; сост. Н. В. Офицорова. – М.: МИПК им. И. Шеберстов, 2006. – 216 с.
13. Ефимов, М. В. Автоматизированное управление полиграфическим производством / М. В. Ефимов. – М.: МГУП «Мир книги», 1998. – 416 с.
14. Сулим П. Е., Юденков В. С. Гибридный способ растривания для ризографической печати // Труды БГТУ. 2017. № 2: Принт- и медиатехнологии. С. 37–43.
15. Сулим, П. Е. Перспективы технологий ризографической печати / П. Е. Сулим, В. С. Юденков // Скориновские чтения 2015: книгоиздание и книгораспространение в контексте кросскультурных коммуникаций XXI века: материалы Международного форума, Минск, 3–6 сентября 2015 г. – Минск: БГТУ, 2015. – С. 230–235.

REFERENCES

1. Sulim P., Yudenkov V. Improvement of the printing quality on a risograph on the basis of the adaptive screening method // Printing Future Days 2015: Proceeding of the 6th International Scientific Conference. Germany, 2015. 109–116 p.
2. Sulim P. E., Yudenkov V. S. Using software for spectral analysis of risographic printing // System analysis and applied informatics. 2015. No. 3. 42–46 p.
3. Sulim P. E., Yudenkov V. S. Method for improving the screening process on an EZ 371E risograph based on software-hybrid technology // Transactions of BSTU. 2016. No. 9: Publ. business and printing. 61–66 p.
4. Acharya T., Ajoy K. Ray Image Processing: Principles and Applications. New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2005. – 428 p.
5. Jane, B. Digital image processing / B. Jane; trans. from English A. M. Izmailova. – M.: Technosphere, 2007. – 584 p.
6. Offset printing paper. Specifications: GOST 9094–89. Minsk: National books. Chamber of Belarus, 1989. – 12 p.
7. Paper and cardboard. Method for determining whiteness: GOST 30113–94. Minsk: Gosstandart, reprint, 2010. – 8 p.
8. Technology of pulp and paper production. T. II: Paper and paperboard manufacturing. Part 2: The main types and properties of paper, cardboard, fiber and wood boards. SPb.: Politekhnik, 2006. – 499 p.
9. Methods and equipment for quality control of printing materials: a reference book for students of specialties 1–47 01 01 «Publishing», 1–47 02 01 «Technology of printing production» / comp.: A. A. Gubarev, M. A. Zilbergleit. – Minsk: BSTU, 2012. – 51 p.

10. Kipphan, G. Encyclopedia of the print media: trans. from german M.: MGUP, 2003. – 1280 p.
11. Kuznetsov, Yu. V. Technology for processing visual information / Yu. V. Kuznetsov. – SPb.: Publishing house «Petersburg Institute of Printing», 2002. – 312 p.
12. Fedorova, I. Technology of printing production. Technology of prepress processes / I. Fedorova; comp. N. V. Ofitserova. – M.: MIPK them. I. Sheberstov, 2006. – 216 p.
13. Efimov, M. V. Automated control of printing production / M. V. Efimov. – M.: MGUP «World of Books», 1998. – 416 p.
14. Sulim P. E., Yudenkov V. S. Hybrid screening method for risographic printing // Transactions of BSTU. 2017. No. 2: Print and Media Technologies. C. 37–43.
15. Sulim, P. E. Prospects for technologies of risographic printing / P. E. Sulim, V. S. Yudenkov // Skorinov readings 2015: book publishing and book distribution in the context of cross-cultural communications of the 21st century: proceedings of the International Forum, Minsk, September 3–6 2015 – Minsk: BSTU, 2015. 230–235 p.

Поступила
30.12.2019

После доработки
01.03.2020

Принята к печати
01.03.2020

YUDENKOV V. S., SULIM P. Y.

STUDY OF THE INFLUENCE OF PAPER PARAMETERS ON QUALITY RIZOGRAPHIC PRINTING

Creation of new digital technologies let automate the reproduction of text and graphic information, led to the creation and development of the digital printing. Digital printing is a technology for producing prints in the printer based on the original layout, created as corresponding codes with a computer. One of the technologies of digital printing is a computer-to-press and one of the devices in this direction is risograph. The risograph printing quality is worse than offset printing. The text is printing with medium sharpness and images remind photos in old newspapers and require special preparation. But risograph is the most profitable solution for small and medium circulations from 50 up to 1000 sheets. Wide usage of risograph printing in typographies demands increase performance of the equipment with the high print quality of digital images. To improve the quality of risographic printing, the creation of methods is required to form the initial indicators of the original layout (clarity, correct transmission of halftones, contrast). At the same time, the result of obtaining high-quality images obtained by printing on a risograph is affected by surface microgeometry and the physical and mechanical properties of paper. So, the optical density of the ink layer on the print is largely determined by the structure of the sections of paper; in particular, absorbency and porosity. To obtain high-quality images on prints, it is necessary not only to customize the original layout, but also to select paper with such characteristics that would allow you to get the best result when printing on a risograph. Since the risograph occupies an intermediate place in quality between copying equipment and laser printing, a laser print is taken as the standard for print quality. And one of the tasks of the quality of risographic prints is to increase it to the quality of laser printing.

Keywords: paper; printing quality; hybrid screenin, screen printing, risograph.



Юденков Виктор Степанович – кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий БНТУ.

Yudenkov Viktor Stepanovich – PhD (Engineering), Assistant Professor. the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian National Technical University.

E-mail: vsjudenkov@bntu.by



Сулим Павел Евгеньевич – магистр технических наук, ассистент кафедры полиграфического оборудования и систем обработки информации БГТУ.

Sulim Pavel Yevgen'yevich – Master of Engineering, assistant lecture, the Department of Printing Equipment and Information Processing Systems. Belarusian State Technological University.

E-mail: sulim@belstu.by

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

УДК 339.138: 004.9

В. А. ВИШНЯКОВ

ОРГАНИЗАЦИЯ ИНТЕРНЕТ МАРКЕТИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ И БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск,
Республика Беларусь

Целью данной работы является анализ методов, подходов, технологий, средств интернет маркетинга (ИМ), использование как известных технологий, так и развития новых: интеллектуальных и блокчейн. Задачами работы анализ и являются выявление тенденций развития интернет маркетинга в цифровой экономике с использованием интеллектуальных и блокчейн технологий, разработки новых структурных решений.

Проведен анализ применения интеллектуальных технологий в маркетинговой деятельности (МД) с использованием облачных вычислений (ОВ) и определены ее особенности. Разработаны предложения по совершенствованию интернет маркетинга (ИМ) в интегрированной среде (традиционной сетевой и облачной) с применением интеллектуальных и блокчейн технологий. Предложено развитие ИМ на базе семейства интеллектуальных агентов для построения интеллектуальных маркетинговых информационных систем (ИМИС). Показано использование технологии блокчейн в ИМ для контроля ресурсов, маркетинговых операций. Приведена новая концепция развития ИМ и ИМИС, на базе которой разработаны подходы к организации ИМИС для связи предприятий, научных институтов и университетов. Разработана структура интеллектуального портала на базе многоагентной технологии, объединяющей разработчиков и потребителей стартапов. Для контроля и гарантированного закрепления авторства стартапов, заключения контрактов используется блокчейн технология.

В качестве тенденции развития ИМ предлагается разработка моделей совместной деятельности интеллектуальных агентов в облачной среде для поддержки принятия решений с использованием технологии блокчейн для юридического закрепления авторства инноваций. Выделены два направления развития интеллектуальных маркетинговых систем: адаптация на цифровых рынках и поддержка инновационной деятельности с закреплением контрактов на базе технологии блокчейн.

Ключевые слова: интеллектуальные, блокчейн технологии, маркетинговая деятельность, маркетинговая информационная система, инструментальная платформа, многоагентные технологии

Введение

Существует недостаточная эффективность МД, о чем свидетельствуют публикуемые данные о проблемах и вызовах отечественной и мировой экономике [1]. Одним из решений этой ситуации является развитие методики и внедрение в МД интеллектуальных и блокчейн технологий, включенных в приоритетные направления Государственной программы «Цифровой экономики» в Республике Беларусь. Анализ информации из интернет-ресурсов о состоянии, особенностей развития и качества товаров (услуг) и иных экономических особенностей в мировой экономике и специфичных данных, отраженных в многочисленных источниках, позволяют получить на осно-

ве их интеллектуального анализа новые знания. Это разрешает спрогнозировать, смоделировать и предупредить развитие тех или иных негативных процессов на региональных рынках. Кроме того, применение интеллектуальных технологий обработки маркетинговой информации и данных позволяет повысить качество и уровень отдачи маркетинговых информационных систем (МИС) [2]. Применение блокчейн технологий уменьшит отрицательные субъективные вмешательства и повысит надежность хранения маркетинговой информации.

Интеллектуализация в интернет-маркетинге

Интеллектуализация функций маркетинга в облачной среде. Рассмотрим базу для разви-

тия интернет-маркетинга и построения МИС в среде ОВ, которой является интеллектуальная сеть Веб 3.0, позволяющая обрабатывать информацию с использованием семантики, формируемой онтологиями [3]. Для обработки сложных бизнес-процессов, включающих несколько предприятий или производственную цепочку в Веб 3.0 организациям нужны интеллектуальные средства, исключающие субъективное управление [2, 4]. Для этого предлагается использование блокчейн технологии для управления активами и контрактами в разрабатываемой маркетинговой системе поддержки инновационной деятельности.

Интеллектуальная среда для распределенной МД будет основываться на агентных технологиях. Обычный программный агент имеет три особенности: автономность, реакцию и коммуникабельность [5]. Эти агенты могут общаться с различными источниками: пользователями и заказчиками, другими агентами или объектами. Добавим к этому формулирование цели, планирование, хранение знаний в тех или иных моделях, действия (обработка) на их базе, улучшение возможностей в процессе функционирования (самообучение), и получим компоненты интеллектуального агента (ИА) для МД.

ИА для МД будут работать в средах ОВ, в которых нужно разработать функции по решению задач интеллектуального управления и маркетинга. Полученные облачные ИА будут поддерживать технологии, основанных на знаниях и обеспечивать процесс логических рассуждений, иметь функции самообучения как на уровне инфраструктуры, так и на уровне приложения. Облачные ИА образуют распределенную МИС, которая будет собирать данные, для их обработки использовать бизнес-аналитику, решать сложные задачи и реагировать на возникающие события [6].

Для разработки интеллектуальной МИС (ИМИС) предлагается концепция: применение интеллектуальных агентов на основе семантик-веб; веб-сервисов и семантических веб-сервисов, функционирующих в интегрированной среде (как в традиционной сетевой, так и в облачной). Полученные средства применим при интеллектуализации МД и поддержки принятия маркетинговых решений. Использование технологий облачных вычислений позволит эффективно решать отдельные задачи в марке-

тинговой деятельности: в области исследований, товарной и ценовой политик, поиска новой информации, рекламы, электронной торговли, принятия решений. Для включения в состав разрабатываемой ИМС предложено использовать следующие сервисы [6, 7].

Сервис «B2B. FileCloud» передает информацию о товарах в среду социальных сетей (СС). Программа отслеживает любые изменения номенклатуры и вносит их в СС. Для получения подробной информации по ценам товаров является сервис «Z-price». При использовании этого приложения можно сравнить цены конкурентов с ценами своей продукции. С помощью сервиса «Ahrefs», можно получить данные об количестве обратных ссылок на сайты конкурентов, количестве ссылающихся страниц, IP-адресов и т. д. Сервис «Rookee» позволяет выполнять SEO-анализ сайта конкурентов, он полезен для анализа основных фраз и контента в целом. Этот сервис позволяет анализировать тексты, которые используются конкурентами при продвижении продукции; понять, почему данный сайт находится вверху поисковых запросов; получать оценочные показатели трафика и контекстной рекламы. Сервис «Zipline» используется для анализа средств коммуникаций в СС *Twitter* и *Instagram*, он отслеживает ключевые слова через указанные СС в режиме реального времени. С помощью этого сервиса можно быстро реагировать на изменения запросов пользователей и рекламировать свои товары или услуги.

Для достижения лучшего эффекта отдельные сервисы из вышеперечисленных лучше использовать вместе. Так сервис «Tweriod» позволяет определить оптимальные сроки для отправки сообщений (большое количество пользователей находятся в сети), а сервис «Buffer» наоборот помогает задержать отправку сообщений. Интегрируя их вместе, можно гарантировать, что сообщения получит большая аудитория потенциальных пользователей.

Блокчейн технология в маркетинге. Блокчейн – это функциональная технология (одно из приоритетных направлений в программе «Цифровая экономика» Республики Беларусь), предназначенная для объективного учета средств и ресурсов различного характера. Она может использоваться как в экономической сфере (криптовалюты, экономика и финансы),

а также потенциально охватывает не экономические направления деятельности (контроль различных проектов, «умные контракты»). К экономическим направлениям относятся: финансовые и экономические показатели; действия с материальными и нематериальными ресурсами, контроль в организациях с различной формой собственности. Блокчейн – также технологическая основа для различных направлений учета и контроля в неэкономических направлениях, а также высшего и среднего уровней менеджмента.

Блокчейн технология со временем станет еще одним прикладным уровнем Интернета, обслуживающей онлайн-платежи, децентрализованный обмен, получение и передачу цифровых активов, а также выпуск и поддержка «умных контрактов». Она становится следующим этапом в обработке информации [8].

Блокчейн технология в проектируемой интеллектуальной МИС станет базой для контроля ресурсов, операций, поддержки правильности электронных платежей, заключения контрактов, закрепления авторства в инновационной деятельности.

Построение интеллектуальной маркетинговой системы

Организация ИМ в облачной среде. Для развития интернет-маркетинга (ИМ) в среде ОВ предложено две инновации. Первая связана с маркетинговыми операциями, которые осуществляются в четырех связанных плоскостях: это поставки материалов и комплектации (прямые закупки), поставки производственных ресурсов (непрямые закупки), работа с партнерами и клиентами. Системы управления прямыми и непрямые поставки поддерживаются подрядчиками по материалам и производственным ресурсам. Управление работой с партнерами и клиентами реализуется с помощью CRM 2, которая функционирует в облачной среде, управляя жизненным циклом инновационных товаров с поддержкой потребителей. Другой инновацией в ИМ являются система работы в реальном времени – RTB (Real Time Bidding). С ее помощью рекламодатели могут общаться и иметь обратную связь с потребителями, которые увидят и оценят рекламные материалы.

В работе [6] выполнен анализ и предложены решения в области интеллектуального

управления, рассмотрены тенденции его развития. Перенесем эти предложения на МД, в результате получим перечень критериев и их значений, которым должна удовлетворять проектируемая интеллектуальная МИС, работающая в интегрированной среде:

- многоуровневость наблюдения за средой, система должна собирать сведения о состоянии рынка из различных источников на разных уровнях наблюдения;

- адаптивность, она способна обнаруживать известные и новые инновации рынка;

- проактивность, система обладает встроенными механизмами реакции на инновацию;

- открытость, она добавляет модули либо агентов для своего функционального расширения.

- двухуровневость управления, система должна совмещать как централизованное, так и распределенное управление.

- защищенность, она имеет средства защиты пользователей и компонентов системы от несанкционированного вмешательства.

Маркетинговая деятельность с блокчейн технологией. В качестве тенденций и концепции развития по использованию новых технологий в МД получаем:

- совершенствование архитектуры ИМС в ОВ, обеспечивающее эффективное управление в условиях неопределенности состояния среды рынка;

- разработка новых моделей МД в ОВ на основе выбора субоптимального варианта реагирования на события рынка;

- совершенствование инструментальных программных средств для МД с интеллектуальной поддержкой принятия решений и исследованием и оценками эффективности методов, моделей и алгоритмов;

- разработка моделей и средств облачной инструментальной платформы для проектирования вариантов интеллектуальных систем МД на основе семантических технологий;

- разработка прикладных АРМов или площадок для управленцев и маркетологов с использованием блокчейн технологий.

Архитектура интеллектуальной маркетинговой системы

Представлены следующие предложения по архитектуре многоагентной системы (МАС)

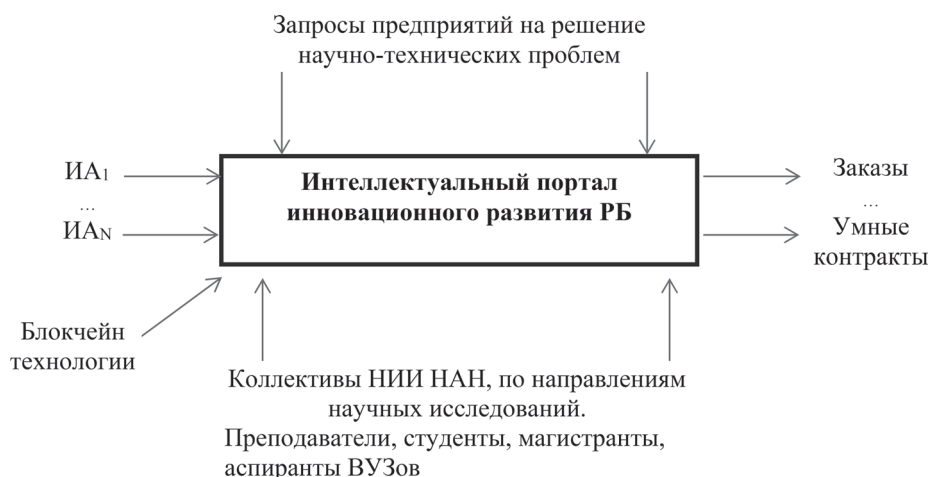


Рис. 1. Структура распределенной интеллектуальной системы интернет маркетинга в рамках цифровой экономики

для реализации функций интернет маркетинга в облачной среде:

- по структуре: МАС включает агентов: товарных, ценовых, коммуникационных, исследования рынка, вычисляющих оценки о состоянии и тенденциях развития рынка;

- по технологии: реализация метода принятия агентами совместного решения, позволяющий сформировать оценки о состоянии рынка в целом и свести для контрактов потенциальных заказчиков и потребителей;

- по методике: реализовывать в системе обнаружение инноваций и использовать эти результаты для предложений по новым разработкам (товаров, услуг);

- по расчетам: вычислять показатели экономической эффективности всех предложенных методов, используя разработанные программные решения МД.

Архитектура ИМИС включает ядро интеллектуализации (распределенную базу знаний на основе моделей их представления (продукционных, фреймовых), интегрированные решатели, объединяющие различные алгоритмы вывода: прямой, обратный, смешанный), так и множество разных типов агентов: товарных, ценовых, маркетинговых исследований, коммуникационных, принятия решений.

Применительно к задаче анализа рынка, агенты исследований передают факты об изменениях внешней среды (цены, товары, конкуренты, потребители и т. д.) в базу знаний. В результате функционирования агентов-решателей формируется заключение, которое передается агенту-обработчику об изменениях внешней среды. Для распределенного решения за-

дач могут быть использованы разные типы агентов: обработчик, коммуникатор, координатор. Агенты могут быть связаны между собой в виде структуры (горизонтальной, вертикальной, смешанной).

Рассмотрим предлагаемую структуру распределенной ИМС с использованием интеллектуального портала инновационного развития (ИПИР) для различных отраслей Республики Беларусь с поддержкой интеллектуальных агентов и применением блокчейн технологий (рисунок). ИПИР в своем составе имеет базу знаний, интеллектуальный решатель, подсистему объяснений, интерфейс $ИА_1$ – $ИА_N$, редактор БЗ, подсистему блокчейн.

Интеллектуальные агенты $ИА_1$ – $ИА_N$ сканируют сайты предприятий республики и сайты научных учреждений и университетов, и формируют базу знаний портала. В нее заносятся от предприятий потенциальные заказы, а от научных коллективов – информацию о направлениях исследований и выполненных проектах.

Решатель находит совпадения и выдает предложения для заказов, объединяя предприятия и научные коллективы. В результате переговоров формируются контракты, которые поддерживаются технологией блокчейн для контроля. Эта же технология будет гарантировать авторство разработчиков инновационных проектов.

Автоматизация проектирования этого портала может использовать семантическую технологию проекта ОСТИС, которая разработана в БГУИР эффективно используется на предприятиях Республики Беларусь [5, 10].

Заключение

1. Предложено два направления интеллектуализации интернет-маркетинга в облачной среде. Первым направлением в построении распределенной интеллектуальной МС является разработка моделей, архитектуры и программных средств для решения проблемы адаптации на рынках товаров и услуг Респу-

блики Беларусь. Вторым направлением является проектирование облачной распределенной интеллектуальной системы интернет маркетинга на основе семантических технологий.

2. Приведена структура интеллектуальной маркетинговой системы для активизации и поддержки инновационной деятельности в Республике Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Интеллектуальные** технологии в управлении. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.eurasian-commission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/SiteAssets/2017.pdf](http://www.eurasian-commission.org/ru/act/prom_i_agroprom/dep_prom/SiteAssets/2017.pdf). – Дата доступа: 9.12.2017.
2. **Вишняков, В. А.** Информационное управление и безопасность: методы, модели, программно-аппаратные решения. Монография. / В. А. Вишняков. – Минск: МИУ, 2014. – 287 с.
3. **Berners-Lee, T.** The Semantic Web, T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila // Scientific American, May 2001. – P. 28–37.
4. **Фингар, П.** Облачные вычисления – бизнес-платформа XXI века. Пер. с англ. Захаров А. В. / П. Фингар / – М.: Аквариумная Книга, 2011. – 256 с.
5. **Голенков, В. В.** Семантическая технология компонентного проектирования систем, управляемых знаниями / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // Материалы 5 межд. науч.технической конференции OSTIS-2015. – Минск: БГУИР, 2015. – С. 57–78.
6. **Вишняков, В. А.** Развитие интеллектуального управления с использованием облачных технологий / В. А. Вишняков // Информатика, 2016, № 2. – С. 113–120.
7. **Вишняков, В. А.** Концепция инструментальной платформы маркетинговой деятельности в среде облачных вычислений с использованием интеллектуальных технологий / В. А. Вишняков, Е. А. Казак // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем – Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): материалы VI междунар. науч.техн. конф. (Минск, 18–20 февраля 2016 года) / редкол.: В. В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУИР, 2016. – С. 545–548.
8. **Свон, М.** Блокчейн. Схема новой экономики / М. Свон. – «Олимп-Бизнес», 2015. – 142 с.
9. **Вишняков В. А.** Использование интеллектуальных и блокчейн технологий в информационном управлении / В. А. Вишняков // Системный анализ и прикладная информатика». 2018 № 1. С. 45–50.
10. **Голенков, В. В.** Проектирование интеллектуальных систем на базе онтологий / В. В. Голенков // Материалы межд. науч.технической конференции OSTIS-2017. – Минск: БГУИР, 2017. – С. 37–56.

REFERENCES

1. **Intelligent** technologies in management [Electronic resources]. Mode of accesses: [http:// www.Eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/depprom/SiteAssets/2017.pdf](http://www.Eurasiancommission.org/ru/act/prom_i_agroprom/depprom/SiteAssets/2017.pdf). – Data of accesses: 9.12.2017.
2. **Vishnyakou, U. A.** Information management and security: methods, models, software and hardware solutions. Monograph. / U. A. Vishnyakou. – Minsk. MIU, 2014. – 287 pp.
3. **Berners-Lee T.** The Semantic Web, T. Berners-Lee, J. Hendler, O. Lassila // Scientific American, May 2001. – P. 28–37.
4. **Fingar, P.** Cloud computing – the business platform of the XXI century / P. Fingar. – M.: Aquamarine Book, 2011. – 256 p.
5. **Golenkov V. V.** Semantic technologies of component design systems manage by knowledge / V. V. Golenkov, N. A. Guliakina // material of 5-th int. conf. OSTIS-2015. – Minsk, BSUIR. – P. 57–78.
6. **Vishnyakou, U. A.** Development of intelligent control by using cloud technologies / U. A. Vishnyakou // Informatics, 2016, No. 2. – P. 113–120.
7. **Vishniakou, U. A.** Concept of the tool platform marketing activities in the cloud computing environment using intelligent technologies / U. A. Vishniakou, E. A. Kazak // Open semantic technology of intelligent systems – Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): proceedings of the VI Intern. scientific. techn. Conf. (Minsk, 18–20 February 2016) / redkol.: V. V. Golenkov (resp. ed.) [et al.]. – Minsk: BSUIR, 2016. – P. 545–548.
8. **Swan, M.** Blockchain. Scheme of the new economy / M. Swan. «Olymp-Business», 2015. 142 p.
9. **Vishniakou, U. A.** The use of intellectual and block chain technologies in the Information management / U. A. Vishniakou // System analysis and applied Informatics». 2018 No. 1. P. 45–50.
10. **Golenkov, V. V.** Ontology-based design of intelligent systems / V. V. Golenkov // material of 7-th int. conf. OSTIS-2017. – Minsk, BSUIR. – P. 37–56.

Поступила
08.01.2020

После доработки
27.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

VISHNIAKOU U. A.

INTERNET MARKETING ORGANIZATION WITH THE USE OF INTELLEAGENT AND BLOCK CHAIN TECHNOLOGIES

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

The purpose of this work is to analyze methods, approaches, technologies, and means of Internet marketing (IM), using both known technologies and developing new ones: intellectual and blockchain. The objectives of the analysis are to identify trends in the development of Internet marketing in the digital economy with the use of intelligent and blockchain technologies, and to develop new structural solutions.

The analysis of the use of intelligent technologies in marketing activities (MA) using cloud computing (CC) is carried out and its features are determined. Proposals have developed for improving Internet marketing in an integrated environment (traditional network and cloud one) using intelligent and blockchain technologies. It is proposed to develop IA on the basis of a family of intelligent agents for building intelligent marketing information systems (IMIS). The use of blockchain technology in IM for controlling resources and marketing operations is shown. A new concept for the development of IM and IIMS is presented, on the basis of which approaches to the organization of IMIS for communication between enterprises, research institutes and universities are developed. The structure of an intelligent portal based on multi-agent technology that unites developers and consumers of startups has been developed. Blockchain technology is used to control and guarantee the authorship of startups and signed contracts.

As IM development trend, the development of models for joint activity of intelligent agents in the cloud environment to support decision-making using blockchain technology to legally secure the authorship of innovations is proposed. There are two areas of development of intelligent marketing systems: adaptation in digital markets and support for innovative activities with the consolidation of contracts based on blockchain technology.



Вишняков Владимир Анатольевич – д. т. н., профессор БГУИР, кафедры инфокоммуникационных технологий – ИКТ.

Vishniakou Uladzimir – doctor of science, Professor of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, department of infocommunication technologies – ICT).

E-mail: vish2002@list.ru

УДК 629.7 + 531.383

А. А. ЛОБАТЫЙ, А. Ю. БУМАЙ

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОМЕРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Рассматривается задача оценивания информации, содержащейся в случайных сигналах, поступающих от различных источников – измерителей. При этом предполагается, что оцениваемый случайный процесс и выход измерителя при математическом описании задачи представляют собой векторные случайные процессы. При этом размерность вектора измерений может быть больше, чем размерность вектора оцениваемого процесса. Проведен анализ аналитических методов и алгоритмов оценивания, основанных на определении основных вероятностных характеристик случайного процесса как априорными, так и апостериорными методами при различных критериях оптимальности. На основе проведенного анализа рассмотрена задача комплексирования измерителей случайного процесса в общей постановке на основе предложенного критерия максимума апостериорного правдоподобия, объединяющего критерий максимума правдоподобия и критерий максимума апостериорной вероятности, на основе чего разработана общая методика комплексирования. Приведенный пример комплексирования фильтров показывает работоспособность предложенного метода. Данный подход к построению алгоритмов оценивания многомерных случайных процессов позволяет повысить точность оценивания, так как учитывает дополнительную информацию и комплексную её обработку.

Ключевые слова: оценивание, критерий, плотность вероятности, фильтрация, комплексирование.

Введение

Среди задач оптимальной обработки информации значительное место занимают задачи оптимального оценивания параметров многомерных случайных в условиях воздействия на них различных помех (неопределенностей). В математической статистике оцениванием называют обработку данных измерений (наблюдений) с целью уменьшения влияния случайных факторов (ошибок) [1, 2]. К системам, решающим такие задачи, можно отнести имеющие большое распространение различные навигационные системы, устанавливаемые на движущихся объектах (ДО), которые перемещаются как поземной или водной поверхности, так и в воздушном или космическом пространстве. Назначением таких навигационных систем является определение собственного положения относительно заданной системы координат. При этом если перемещение ДО происходит в пределах Земли, то неподвижную систему координат «привязывают» к Земле, если движение ДО происходит в пределах солнечной системы, то – к Солнцу и так далее.

Одними из самых распространенных ДО являются беспилотные летательные аппараты (БЛА), представляющие широкий класс самодвижущихся летательных аппаратов, различающихся предназначением, принципами построения, выполняемыми задачами. Для непосредственного измерения навигационных параметров или физических величин, которые используются для определения этих параметров на борту БЛА, применяются различные устройства и системы: инерциальные навигационные системы (как правило, бесплатформенные); радиотехнические высотомеры и измерители скорости; барометрические и геомагнитные датчики; измерители воздушного давления и прочие приборы, основанные на различных физических принципах. Среди внешних источников информации о навигационных параметрах, находящихся за пределами БЛА, наибольшее распространение имеют спутниковые навигационные системы (СНС), к которым относятся системы GPS, ГЛОНАСС, DORIS, Galileo, Beidou [3, 4, 5]. К дополнительным источникам навигационной информации можно также отнести системы телеме-

трии, установленные как на борту БЛА, так и на наземных пунктах управления (радиомаяки и т. п.). Навигационная информация, поступающая от различных источников, как правило, отличается точностью и достоверностью, так как получается на основе различных физических принципов, каждый из которых имеет свою природу неопределенностей. Всё это ставит на повестку дня задачу комплексирования различных источников информации для повышения точности и достоверности выделения полезной составляющей. Принципы комплексирования измерителей могут быть различными, основанными на различиях у измерителей и той же физической величины спектральных, амплитудных или иных информационных характеристик.

Задача оценивания вероятностных характеристик случайного процесса

Рассмотрим общую постановку задачи оценивания вероятностных характеристик многомерного случайного процесса с помощью многомерного измерителя. В общем случае система уравнений, описывающая эволюцию состояния исследуемой системы (например – движение БЛА, как и любого ДО) с учетом неопределенностей представляет собой пример функционального представления модели динамической системы как нестационарного нелинейного управляемого объекта, подверженно-го действию возмущений [6]:

$$\begin{aligned}\dot{X}(t) &= \varphi(X, t) + W(t)U(t) + H(t)\xi(t), \\ X(t_0) &= X_0,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\varphi(X, t)$ – в общем случае нелинейная векторная функция, $X = [x_1 \dots x_n]^T = X(t)$ – вектор переменных, описывающих пространство состояний системы, $X \in R^n$, где R^n – n -мерное евклидово пространство векторов. $U = [u_1 \dots u_h]^T = U(t)$ – вектор управлений, $U \in R^h$. $\xi = [\xi_1 \dots \xi_n]^T = \xi(t)$ – вектор белых шумов (возмущений) с матрицей интенсивностей $G(t)$, характеризующий неопределенности, оказывающие влияние на эволюцию $X(t)$, $W(t)$ и $H(t)$ – матрицы переменных (в общем случае) коэффициентов.

Заметим, что математическую модель практически любого случайного процесса можно представить как результат прохождения белого шума через соответствующий формирующий фильтр, представляющий собой совокупность

математических выражений, с помощью которых из белого шума получают случайный процесс с заданной корреляционной функцией. Добавив выражения, описывающие формирующий фильтр, к уравнению (1), получим математическое представление векторного марковского процесса. Для анализа эволюции такого процесса, описываемого уравнением (1), удобно использовать уравнение Фоккера–Планка–Колмогорова (в западных источниках – уравнение Фоккера–Планка) для многомерной функции плотности вероятности $f(X, t)$, которое имеет вид [1, 6]:

$$\frac{\partial f(X, t)}{\partial t} = -\nabla_x^T \pi(X, t), \quad f(X, t_0) = f_0(X_0), \quad (2)$$

где $\pi(X, t)$ – вектор плотности потока вероятности вида

$$\pi(X, t) = A(X, t)f(X, t) - \frac{1}{2}[\nabla_x^T B(X, t)f(X, t)]. \quad (3)$$

∇_x – векторный оператор дифференцирования (оператор градиента), который имеет вид: $\nabla_x^T = [\partial/\partial x_1 \dots \partial/\partial x_n]$, n – размерность вектора $X(t)$. $A(X, t)$ и $B(X, t)$ соответственно, вектор сноса и матрица диффузии, которые называются также локальными характеристиками марковского процесса и определяются на основе введения в рассмотрение таких понятий, как стохастические интеграл – интегралы по времени от белых шумов. Заметим, что стохастические интегралы вычисляются как предел в среднем квадратическом суммы, каждый член которой представляет собой произведение элементарного подинтервала на значение соответствующей функции либо вначале каждого подинтервала (стохастический интеграл Ито), либо в середине каждого подинтервала (симметризованный стохастический интеграл Стратоновича-Фиска) [1, 6]. Не смотря на то, что интегралы Ито требуют осторожного обращения при замене переменных и интегрировании по частям, они удобнее при решении ряда задач анализа и синтеза стохастических систем, так как в выражении для вектора сноса $A(X, t)$ отсутствует дополнительное слагаемое, связывающее его с вектором $\xi(t)$. При такой трактовке стохастических интегралов в форме Ито и процесса (1) выражения для $A(X, t)$ и $B(X, t)$ имеют вид: $A(X, t) = \varphi(X, t) + W(X, t)U(X, t)$, $B(X, t) = H(t)G(t)H^T(t)$.

Нахождение решения уравнения (2) особенно для многомерных систем представляет собой неразрешимую задачу, которая существенно упрощается при применении различных способов аппроксимации функции $f(X, t)$. Наиболее распространенным является применение двухмоментной гауссовой аппроксимации $f(X, t)$, основанной на применении центральной предельной теоремы теории вероятностей. Выражение для гауссовой многомерной плотности вероятности имеет вид [1, 6]:

$$f(X, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\theta(t)|}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X(t) - m_x(t))^T \theta^{-1}(t) (X(t) - m_x(t)) \right\}. \quad (4)$$

В выражении (5) $|\theta(t)|$ – определитель ковариационной матрицы $\theta(t)$ вектора $X(t)$, $m_x(t)$ – математическое ожидание вектора $X(t)$. В скалярной форме выражение (4) имеет вид:

$$f(X, t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n |\theta|}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2|\theta|} \sum_{p,q=1}^n \theta^{pq} (x_p - m_{xp})(x_q - m_{xq}) \right\}, \quad (5)$$

где θ^{pq} – алгебраическое дополнение элемента θ_{pq} в определителе $|\theta|$. Здесь аргумент t для упрощения записи опущен.

Задача вероятностного анализа процесса $X(t)$ упрощается, если уравнение, описывающее эволюцию процесса (1), является линейным. Обоснованность линеаризации системы (1) обусловлена малой степенью отклонений параметров возмущённого движения объекта (например, БЛА) от их номинальных значений. Обычно принимается, что если отклонения входных параметров систем $\delta U(t)$ и вызываемые ими отклонения выходных параметров $\delta X(t)$ не превосходят 3–5% номинальных значений, то такое требование выполняется, что даёт основание представлять возмущённое движение в виде линейной комбинации $U(t) = U^*(t) + \delta U(t)$, $X(t) = X^*(t) + \delta X(t)$ [1]. Параметры, обозначенные звёздочкой, отвечают номинальному невозмущённому движению. Объединяя в одну систему уравнения номинального и возмущённого движения, получим каноническую форму математической модели состояния линейной (линеаризованной) нестационарной системы:

$$\dot{X}(t) = D(t)X(t) + W(t)U(t) + H(t)\xi(t), \quad (6)$$

$$X(t_0) = X_0.$$

$D(t)$, $W(t)$, $H(t)$ – матрицы коэффициентов. Из уравнения (6) достаточно просто получаются дифференциальные уравнения для вектора математических ожиданий $m_x(t) = M[X(t)]$ и ковариационной матрицы $\theta(t) = M[(X(t) - m_x(t))[X(t) - m_x(t)]^T]$ (здесь $M[\dots]$ – операция математического ожидания – «осреднения») вектора $X(t)$, которые имеют вид:

$$\dot{m}_x(t) = A(t)m_x(t) + W(t)U(t), \quad m_x(t_0) = m_{x0}. \quad (7)$$

$$\dot{\theta}(t) = D(t)\theta(t) + \theta(t)D^T(t) + H(t)G(t)H^T(t), \quad (8)$$

$$\theta(t_0) = \theta_0.$$

Задачи определения наилучших (оптимальных) значений процесса $X(t)$ на основании имеющихся наблюдений в виде вектора $Z(t_1)$ в зависимости от того, как расположен момент времени t_1 по отношению к моменту времени t представляют собой задачи оценивания (фильтрации, сглаживания или экстраполяции). Задача фильтрации является основной. Рассмотрим эту задачу, учитывая, что совокупность выходов измерителей процесса $X(t)$ представляет собой вектор $Z = [z_1 \dots z_m]^T = Z(t)$, $Z \in R^m$. Вектор наблюдений $Z(t)$ связан с вектором состояния $X(t)$ нелинейной векторной функцией $C(X, t)$. При этом наблюдение (измеритель) имеет аддитивную помеху $\zeta(t)$, обусловленную технологическими и внешними факторами, не связанными с процессом $X(t)$:

$$Z(t) = C(X, t) + \zeta(t). \quad (9)$$

Обычно $\zeta(t)$ принимается векторным центрированным гауссовым белым шумом с матрицей интенсивностей $Q(t)$. Обоснованность такого допущения основана на том, что в пределах полосы пропускания измерителя величина спектральной плотности шума $\zeta(t)$ является (принимается) постоянной.

Полной вероятностной характеристикой $X(t)$ в момент времени t при измерении вектора $X(t)$ является условная апостериорная функция плотности вероятности, обозначаемая $f(X, t) = f(X, t | Z, \tau)$. Эволюция $\hat{f}(X, t)$ описывается интегро-дифференциальным уравнением Стратоновича-Кушнера для апостериорной плотности вероятности [1, 7]:

$$\frac{\partial \hat{f}(X, t)}{\partial t} = -\nabla_x^T \hat{\pi}(X, t) - \frac{1}{2} \left[\rho(\hat{X}, Z, t) - \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\hat{X}, Z, t) \hat{f}(X, t) dX \right] \hat{f}(X, t), \quad (10)$$

где

$$\hat{\pi}(X, t) = A(X, t) \hat{f}(X, t) - \frac{1}{2} \left[\nabla_x^T (B^T(X, t) \hat{f}(X, t)) \right]^T. \quad (11)$$

$\rho(\hat{X}, Z, t)$ – функция невязки, вычисляемая по формуле:

$$\rho(\hat{X}, Z, t) = \left[Z(t) - C(\hat{X}(t)) \right]^T Q^{-1}(t) \left[Z(t) - C(\hat{X}(t)) \right]. \quad (12)$$

Уравнение Стратоновича-Кушнера не может быть решено непосредственно не только в силу трудностей вычислений, но и в связи с тем, что в нем присутствует истинное значение оцениваемого процесса $X(t)$, которое по условию задачи не может быть определено. При решении практических задач фильтрации, как правило, требуется определить оптимальную апостериорную оценку $\hat{X}(t) = X(t | Z)$. В качестве критерия оптимальности чаще всего рассматривается минимум среднего квадрата ошибки оценивания – математическое ожидание функции $[X(t) - \hat{X}(t)]^2$. В то же время критерием оптимальности может быть и максимум функции $\hat{f}(X, t)$ (максимум апостериорной вероятности – MAB), при котором:

$$\hat{X}_{\text{MAB}}(t) = \operatorname{argmax}_X \hat{f}(X, t) = \operatorname{argmax}_X f(X | Z). \quad (13)$$

При гауссовой аппроксимации $\hat{f}(X, t)$, как показано в [7], выражения для оптимальной оценки $\hat{X}(t)$ имеют тот же вид, что и при квадратичном критерии.

В качестве оптимальной оценки $\hat{X}(t)$ обычно рассматривается условное математическое ожидание $X(t)$, вычисляемое как интеграл вида:

$$\hat{X}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \hat{f}(X, t) dX. \quad (14)$$

Так как найти точное значение интеграла (14) с учетом (1), (9) и (10) практически невозможно, то применяют так называемые субоптимальные алгоритмы, основанные на различ-

ных способах аппроксимации нелинейных функций $\phi(X, t)$ и $C(X, t)$ (кусочно-полиномиальная, кусочно-линейная). Распространенной и удобной для использования является линейная аппроксимация данных нелинейных функций. При этом выражения (6) и (9) принимают вид:

$$\dot{X} = D(t)X(t) + W(t)U(t) + H(t)\xi(t), \quad (15)$$

$$X(t_0) = X_0,$$

$$Z(t) = C(t)X(t) + \zeta(t). \quad (16)$$

$\zeta(t)$ – белый шум измерителя, $C(t)$ – матрица коэффициентов.

В простейшем случае линейной постановки задачи, когда процесс $X(t)$ описывается уравнением (15), а измеритель – выражением (16), вектор сноса имеет вид $A(X, t) = D(t)X(t) + W(t)U(t)$, а матрица диффузии равна интенсивности шума $\xi(t)$ $B(X, t) = G(t)$. При этом дифференциальное уравнение для определения оптимальной оценки $\hat{X}(t)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{X}}(t) &= D(t)\hat{X}(t) + W(t)U(t) + \\ &+ R(t)C^T(t)Q^{-1}(t)[Z(t) - C(t)\hat{X}(t)], \quad (17) \\ \hat{X}(t_0) &= M[X_0]. \end{aligned}$$

В выражении (17) $R(t)$ – апостериорная корреляционная матрица, дифференциальное уравнение для которой имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{R}(t) &= D(t)R(t) + R(t)D^T(t) + \\ &+ H(t)G(t)H^T(t) - R(t)C^T(t)Q^{-1}(t)C(t)R(t), \quad (18) \\ R(t_0) &= R_0. \end{aligned}$$

Выражения (17) и (18) представляют собой классический фильтр Калмана (Калмана-Бьюси) [8]. Заметим, что при использовании данного фильтра в различных системах обработки информации необходимо учитывать, что математические модели процессов $X(t)$ и $Z(t)$ могут отличаться от их реальных физических представлений по причине их неточной идентификации, что может приводить к существенным методическим ошибкам фильтрации [9].

Задача комплексирования измерителей и фильтров

В большинстве практических задач считается, что размерность вектора измерений $Z(t)$ меньше размерности вектора процесса $X(t)$ ($m \leq n$), однако возможна постановка задачи, когда для одной из составляющих $x_i(t)$ процесса $X(t)$ име-



Рис. 1. Структура процесса фильтрации

ется несколько измерителей ($m > n$). В этом случае для повышения точности и достоверности оценивания процесса $X(t)$ необходимо осуществлять комплексирование измерителей и соответствующих фильтров. В работе [10] предлагается метод комплексирования, основанный на пошаговой обработке результатов, полученных от нескольких фильтров Калмана. Метод основан на использовании перехода от гауссовых апостериорных оценок процесса $X(t)$ к нечетким функциям принадлежности с последующей обработкой полученной информации по правилам нечеткой логики. Следует однако заметить, что практическая реализация данного подхода требует больших вычислительных затрат информационной системы.

Процессы измерения и фильтрации можно представить в виде структурной схемы (рис. 1), где для упрощения записи обозначены плотности вероятности:

$$f(X) = f(X, t), \quad f(Z) = f(Z, t), \\ f(Z|X) = f(Z, t|X, t) \quad f(X|Z) = \hat{f}(X, t|Z, t).$$

Априорные и апостериорные плотности вероятности связаны между собой известной формулой Байеса:

$$f(X|Z)f(Z) = f(Z|X)f(X). \quad (19)$$

В качестве оценки вектора состояния в ряде случаев может рассматриваться функция $f(Z|X)$, которая характеризует условную плотность вероятности множества измерений $Z(t)$ при фиксированном значении $X(t)$. Оптимальным считается значение $X(t)$, при котором условная плотность вероятности $f(Z|X)$ имеет максимальное значение [11]. Такой критерий называется критерием максимума правдоподобия (МП). Его целесообразно применять при комплексировании нескольких измерителей одного параметра при отсутствии оптимальной фильтрации:

$$\hat{X}_{МП}(t) = \operatorname{argmax}_X f(Z|X). \quad (20)$$

В общем случае критерий МАВ (13) может содержать больше информации о процессе $X(t)$,

чем критерий МП (20), но в некоторых случаях, когда отсутствует фильтрация и размерность вектора измерений $Z(t)$ больше размерности вектора процесса $X(t)$, критерий МП может представить более точный результат получения оптимальной оценки $X(t)$. Обоснуем данное предположение.

Так как безусловная плотность вероятности $f(Z)$ не зависит непосредственно от $X(t)$, то значения $\hat{X}_{МП}(t)$ в соответствии с формулами (19) и (20) могут определяться путем максимизации по $X(t)$ совместной плотности $f(Z|X)f(X)$. Для гладких и дифференцируемых плотностей вероятности из формулы (19) следует:

$$\frac{\partial f(X|Z)}{\partial X} f(Z) = \frac{\partial f(Z|X)}{\partial X} f(X) + f(Z|X) \frac{\partial f(X)}{\partial X}. \quad (21)$$

В выражении (21) обозначено $\frac{\partial f(\dots)}{\partial X} = \nabla_x^T [\partial / \partial x_1 \dots \partial / \partial x_n]$.

Из выражения (21) следует, что необходимым условием МАВ является:

$$\left[\frac{\partial f(X|Z)}{\partial X} \right]_{X(t) = \hat{X}_{МАВ}(t)} = 0. \quad (22)$$

Соответственно необходимым условием МП является:

$$\left[\frac{\partial f(Z|X)}{\partial X} \right]_{X(t) = \hat{X}_{МП}(t)} = 0. \quad (23)$$

Так как для многомерных процессов определение плотностей вероятности не представляется возможным, то в качестве оценок рассматривают первые $m_x(t) = M[X(t)] = X(t)$ и вторые $R_x(t) = M[(X(t) - X(t))^2]$ апостериорные вероятностные моменты этих процессов, на основе гауссовой аппроксимации плотностей вероятностей, что имеет место при калмановской фильтрации. При наличии нескольких измерителей и соответственно – нескольких алгоритмов фильтрации процесса $X(t)$ для их комплексирования рассмотрим условную апостериор-

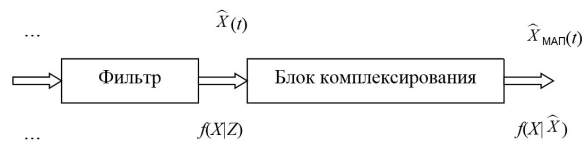


Рис. 2. Структура процесса комплексирования

ную плотность вероятности, которую обозначим $f(X|X)$:

$$f(X|\hat{X}) = \prod_{k=1}^m f(X|Z) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^m \prod_{k=1}^m R_k}} \times \exp \left\{ -\sum_{k=1}^m \frac{(x_k - \hat{x}_k)^2}{2R_k} \right\}. \quad (24)$$

В выражении (24) R_k и $\hat{x}_k$ – апостериорные вероятностные моменты k -х выходов фильтров Калмана. Критерием комплексирования (оптимальной оценки процесса $X(t)$) в этом случае будет максимум апостериорного правдоподобия (МАП), которому соответствует выражение:

$$\hat{X}_{\text{МАП}}(t) = \operatorname{argmax}_{\hat{X}} f(X|\hat{X}). \quad (25)$$

Таким образом, в схему, представляющую структуру процесса фильтрации (рис. 1), необходимо добавить блок комплексирования (рис. 2)

Полученные апостериорные оценки $\hat{x}_i(t) = [\hat{x}_{i1} \dots \hat{x}_{im}]^T$ ($i = \overline{1, m}$) переменной $x_i(t)$ являются случайными процессами с нулевыми математическими ожиданиями и дисперсиями R_i , вычисленными на основе решения уравнений (17) и (18).

Предполагая, что существует совместная плотность вероятности апостериорных оценок $f(X|X)$: вектора $X(t)$ необходимым условием МАП является:

$$\left[\frac{\partial f(Z|\hat{X})}{\partial X} \right]_{X(t)=\hat{X}_{\text{МАП}}(t)} = 0. \quad (26)$$

Соответственно оценка максимального правдоподобия по апостериорной дисперсии будет корнем уравнения:

$$\left[\frac{\partial f(X|\hat{X})}{\partial X} \right]_{R(t)=R_{\text{МАП}}(t)} = 0. \quad (27)$$

При m независимых наблюдениях $z_k(t)$ и m фильтров Калмана ($k = \overline{1, m}$) значения апостериорных характеристик $\hat{x}_{\text{МАП}}$ и $R_{\text{МАП}}$ случайного процесса $x(t)$, при использовании критерия МАП в соответствии с (26) и (27) вычисляются из выражения (24) по формулам:

$$\hat{x}_{\text{МАП}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \hat{x}_k, \quad \hat{R}_{\text{МАП}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m R_k. \quad (28)$$

Заметим, что в условиях наличия неопределенностей точность апостериорного оценивания по критерию МАП в соответствии с выражениями (28) будет тем выше, чем больше число измерителей и фильтров. Это не сложно доказывается математически.

Пример

В качестве примера рассмотрим для наглядности одномерную систему с двумя измерителями, эволюция которой характеризуется уравнениями (15) и (16), преобразованными к виду:

$$\dot{x}(t) = ax(t) + \xi(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (29)$$

$$z_1(t) = c_1 x(t) + \zeta_1(t) \quad (30)$$

$$z_2(t) = c_2 x(t) + \zeta_2(t). \quad (31)$$

где $\xi(t)$ – белый шум процесса интенсивности g и $M[\xi] = 0$; $\zeta_1(t)$ и $\zeta_2(t)$ – соответствующие центрированные белые шумы измерителей $z_1(t)$ и $z_2(t)$ с интенсивностями q_1 и q_2 . Плотность вероятности процесса $x(t)$ гауссова вида:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_x}} \exp \left\{ -\frac{(x - m_x)^2}{2D_x} \right\}. \quad (32)$$

Для независимых наблюдений $z_1(t)$, $z_2(t)$ случайного процесса $x(t)$ и двух фильтров Калмана можно записать выражение для условной совместной апостериорной плотности вероятности $f(x|\hat{x}_1, \hat{x}_2)$:

$$f(x|\hat{x}_1, \hat{x}_2) = f(x|z_1, \hat{x}_1) f(x|z_2, \hat{x}_2) = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_{x_1} R_{x_2}}} \exp \left\{ -\frac{(x - \hat{x}_1)^2}{2R_{x_1}} - \frac{(x - \hat{x}_2)^2}{2R_{x_2}} \right\}, \quad (33)$$

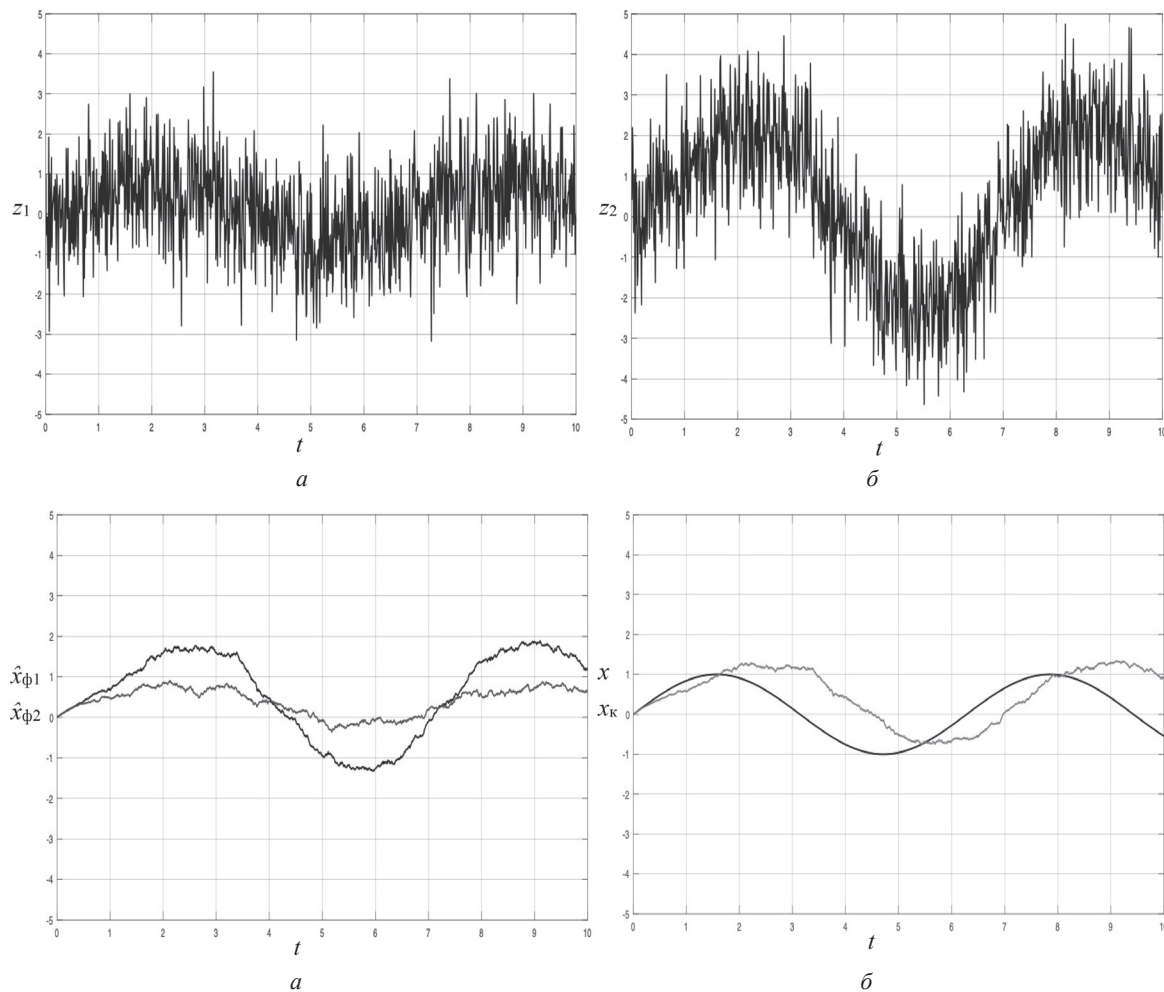


Рис. 3. результаты математического моделирования

где $\hat{x}_1$ и $\hat{x}_2$, R_{x1} и R_{x2} – соответственно апостериорные математические ожидания и дисперсии, вычисленные на основе применения алгоритмов фильтра Калмана (17) – (18).

Оценка максимального апостериорного правдоподобия для среднего значения $\hat{x}$ является корнем уравнения (25), которое в данном случае двух измерителей будет иметь корень $\hat{x}_{\text{МАП}} = \frac{1}{2}(\hat{x}_1 + \hat{x}_2)$, который является несмещенной оценкой максимального апостериорного правдоподобия для среднего значения оцениваемого процесса $x(t)$.

На рис. 3 представлены результаты математического моделирования, выполненного в среде Matlab-Simulink. На рис. 3, а, б представлены графики изменения выходных сигналов измерителей. На рис. 3, в – графики изменения выходных сигналов фильтров. На рис. 3, г – график входного сигнала $x(t)$ и график сигнала, полученного в результате комплексирования двух фильтров $x_k = x_k(t) = \hat{x}_{\text{МАП}}$. Как по-

казали результаты, представленные на графиках, результирующий процесс $x_k(t)$ ближе к $x(t)$, чем выходные сигналы каждого из фильтров $\hat{x}_{\phi1}$ и $\hat{x}_{\phi2}$. Запаздывание процессов $\hat{x}_{\phi1}$, $\hat{x}_{\phi2}$ и $x_k(t)$ относительно $x(t)$ обусловлено инерционностью математической модели оптимальной обработки информации (фильтра Калмана). Полученные результаты подтверждают обоснованность приведенных выше теоретических положений.

Заключение

На основе анализа существующих методов и алгоритмов оценивания многомерных случайных процессов предложен новый критерий оценивания – максимум апостериорного правдоподобия. Обоснованность такого критерия основана на том, что интенсивное развитие технических систем ставит задачу получения оптимальной оценки информации, полученной от различных источников и соот-

ветственно отфильтрованной по критериям и правилам оптимальной обработки информации на основе известных математических моделей оцениваемых процессов и измерителей.

Полученные выражения для комплексирования апостериорных оценок процесса являются обоснованными в рамках линейных математических моделей процессов и измерите-

лей, а также – принятых допущений о гауссовом характере имеющихся неопределенностей. Результаты математического моделирования показали работоспособность предложенного метода комплексирования. Метод позволяет решать ряд практических задач. При этом точность и достоверность полученных результатов будет определяться обоснованностью соответствующих допущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красовский А. А.** Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. **Rogers R. M.** Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, Third Edition / Robert M. Rogers – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. – 326 p. ISBN-13: 978-1563479274.
3. **Алешин Б. С., Веремеенко К. К., Черноморский А. И.** Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. – М.: Физматлит, 2006. – 424 с.
4. **Zipfel P. H.** Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics, Third Edition / Peter H. Zipfel – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. – 661 p. ISBN-13: 978-1624102509.
5. **Siouris G. M.** Missile Guidance and Control Systems / George M. Siouris – Berlin: Springer Science+Business Media, 2006. – 666 p. ISBN 978-0-387-21816-8
6. **Пугачев, В. С.** Теория стохастических систем / В. С. Пугачев, И. Н. Сеницын. – М.: Логос, 2004. – 1000 с.
7. **Лобатый А. А.** Оптимальное оценивание случайного процесса по критерию максимума апостериорной вероятности / А. А. Лобатый, Ю. Ф. Яцына, Н. Н. Арефьев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 1. – С. 35–41.
8. **Сеницын И. Н.** Фильтры Калмана и Пугачёва / И. Н. Сеницын. – М.: Университетская книга, 2006. – 640 с.
9. **Лобатый А. А.** Особенности применения фильтров Калмана-Бьюси в комплексах ориентации и навигации / А. А. Лобатый, А. С. Бенкафо // Доклады БГУИР. – 2013. – № 5(75). – С. 67–71.
10. **Лобатый А. А.** Пошаговая нечеткая коррекция алгоритма фильтрации случайных сигналов / А. А. Лобатый, А. С. Радкевич // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 1. – С. 35–40.
11. **Сейдж Э.** Теория оценивания и её применение в связи и управлении / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: «Связь», 1976. – 496 с.

REFERENCES

1. **Krasovskij A. A.** Handbook of the theory of automatic control / ed. A. A. Krasovskogo. – M.: Nauka, 1987. – 712 p.
2. **Rogers R. M.** Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, Third Edition / Robert M. Rogers – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. – 326 p. ISBN-13: 978-1563479274
3. **Aleshin B. S., Veremeenko K. K., Chernomorskij A. I.** Orientation and navigation of moving objects: modern information technology / ed. B. S. Aljoshina, K. K. Veremeenko, A. I. Chernomorskogo. – M.: Fizmatlit, 2006. – 424 p.
4. **Zipfel P. H.** Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics, Third Edition / Peter H. Zipfel – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014. – 661 p. ISBN-13: 978-1624102509
5. **Siouris G. M.** Missile Guidance and Control Systems / George M. Siouris – Berlin: Springer Science+Business Media, 2006. – 666 p. ISBN 978-0-387-21816-8
6. **Pugachev V. S.** Theory of stochastic systems / V. S. Pugachev, I. N. Sinicyn. – M.: Logos, 2004. – 1000 p.
7. **Lobaty A. A.** Optimal estimation of a random process by the criterion of maximum a posteriori probability / A. A. Lobaty, Ju. F. Jacyna, N. N. Aref'ev // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2016. – № 1. – S. 35–41 p.
8. **Sinicin I. N.** Kalman and Pugachev filters / I. N. Sinicin. – M.: Universitetskaja kniga, 2006. – 640 p.
9. **Lobaty A. A.** Features of the application of Kalman-Bucy filters in orientation and navigation systems / A. A. Lobaty, A. S. Benkafo // Doklady BGUIR. – 2013. – № 5(75). – S. 67–71 p.
10. **Lobaty A. A.** Step-by-step fuzzy correction of a random signal filtering algorithm / A. A. Lobatyj, A. S. Radkevich // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2019. – № 1. – S. 35–40 p.
11. **Sage J.** Theory of evaluation and its application in communication and management / J. Sage, J. Mels. – M.: «Svjaz'», 1976. – 496 p.

Поступила
01.01.2020

После доработки
27.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

LOBATY A. A., BUMAI A. Y.

FEATURES OF CONSTRUCTION OF EVALUATION ALGORITHMS MULTIDIMENSIONAL RANDOM PROCESSES

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

The problem of evaluating the information which is present in random signals from various sources-meters is considered. It is assumed that the random process which is evaluated and the meter output according mathematical description of the problem are vector random processes. In this case, the dimension of the vector of the measurement can be larger than the dimension of the vector of the process being evaluated. The analysis of analytical methods and algorithms of the estimation that based on the determination of the main probabilistic characteristics of a random process by both the a priori and the a posteriori methods with various optimality criteria is carried out. Based on the analysis, the problem of complexing of the meters of the random process is considered according the proposed criterion for the maximum of posterior verisimilitude, combining the criterion of maximum verisimilitude and the criterion of maximum the a posteriori probability, general methodology complexing is developed. Proposed example of the complexing shows the efficiency of the proposed method. This approach to the construction of the algorithms of the evaluation for multidimensional random processes allows to increase the accuracy of estimation, since it takes into account additional information and its complex processing.

Keywords: estimation, criterion, probability density, filtration, complexing.



Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор. С 2000 года возглавляет кафедру «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета.

Lobaty A. A., doctor of Science, Professor. From 2000 he heads of the department «Information Systems and Technologies» at the Belarusian National Technical University.

Тел: + 375 (29) 346–82–56.

E-mail: lobaty@bntu.by



Бумай Андрей Юрьевич, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета.

Bumai A. Y., PhD student of « Information Systems and Technologies» department of Belarusian National Technical University.

E-mail: andrei.bumai@gmail.com

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

УДК 004.056.55

В. А. ЛИПНИЦКИЙ, С. И. СЕМЁНОВ

СИНДРОМНЫЕ СПЕКТРЫ ОРБИТ ОШИБОК В РС-КОДАХ

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Данная статья посвящена исследованию свойств синдромов ошибок в кодах Рида-Соломона. РС-коды построены на недвоичных алфавитах. Поэтому, в отличие от кодов Боуза-Чоудхури-Хоквингема, РС-коды содержат исключительно большое многообразие корректируемых ошибок. Для коррекции этих ошибок предлагается систематическое применение автоморфизмов кодов. Характерными автоморфизмами РС-кодов являются циклические и аффинные подстановки, образующие циклические группы Γ и A соответственно, порядки которых совпадают с длиной кода. Показано, что циклическая и аффинная подстановки коммутируют друг с другом и порождают совместную АГ-группу как прямое произведение подгрупп A и Γ . Данные три группы действуют на пространстве векторов-ошибок РС-кодов, разбивая это пространство на три вида орбит ошибок. Как правило, эти орбиты являются полными, то есть содержат максимально возможное количество ошибок. Синдромы являются основным индикатором наличия ошибок в каждом принятом ИКС сообщении, средством точной идентификации этих ошибок. Исследована специфика синдромов двойных ошибок в РС-кодах. Установлено, что спектры синдромов орбит ошибок также являются полными в подавляющем большинстве случаев. Доказано, что структура спектров синдромов копирует структуру самих орбит, которые в свою очередь копируют структуру групп автоморфизмов кода. Полученные результаты являются существенным вкладом в построение ТНС для кодов Рида-Соломона.

Ключевые слова: линейный код, РС-код, синдромы ошибок, автоморфизмы кодов, циклическая подстановка, аффинная подстановка, орбиты векторов-ошибок.

Введение

Коды Рида-Соломона, благодаря лежащему в их основе недвоичному алфавиту и большому минимальному расстоянию, способны корректировать большие ансамбли ошибок, поэтому постоянно расширяется спектр приложений данных кодов [1–3].

Перевод теории РС-кодов с полиномиального языка на матричный открывает перспективы широкого применения в обработке этих кодов теории поле Галуа, развития теории норм синдромов (ТНС) на коды Рида-Соломона [4, 5].

ТНС строится на основе хорошей, легко конструируемой группы автоморфизмов, действующих на применяемом линейном коде. В кодах БЧХ такими были циклические и циклотомические подстановки [5]. Как показали исследования [6], циклотомическая подстановка из-за недвоичного алфавита не может быть автоморфизмом РС-кода, однако при несколько расширенном понимании автоморфизма линейного кода (как невырожденного линейного преобразования) к ним можно отне-

сти аффинные подстановки или гомотетии. Данная работа посвящена развитию существенного раздела ТНС – исследованию свойств синдромов ошибок и специфики синдромных спектров орбит ошибок в кодах Рида-Соломона.

Необходимые сведения о кодах Рида-Соломона

Под кодом Рида-Соломона мы понимаем линейный блочный код длины $N = q - 1$, определенный над полем Галуа $GF(q)$ из q элементов, где $q = p^m > 2$ для простого числа p и натурального $m \geq 1$, который задается проверочной матрицей:

$$H = \left[\alpha^{bi}, \alpha^{(b+1)i}, \dots, \alpha^{(\delta-2+b)i} \right]^T, 0 \leq i \leq N-1, \quad (1)$$

с элементами, принадлежащими полю $GF(q)$ [1, 3, 4]. Матрица (1) имеет размерность $(\delta-1) \times N$ и ранг $\delta-1$ над полем $GF(q)$. В дальнейшем этот код будем обозначать через $RS(N, K)$, где N – длина РС-кода, $K = N - \delta + 1$ – количество информационных символов, раз-

мерность кода. Минимальное расстояние РС-кода равно $D = N - K + 1 = \delta$ [1, с. 289].

На практике предпочтение отдается РС-кодам с $b = 1$. Тогда проверочная матрица (1) принимает вид:

$$H = [\alpha^i, \alpha^{2i}, \dots, \alpha^{(\delta-1)i}]^T, \quad 0 \leq i \leq N-1, \quad (2)$$

Векторы-ошибки в кодах $RS(N, K) = RS(q-1, q-\delta)$ принадлежат $(q-1)$ -мерному векторному пространству $V_N(GF(q))$ над полем Галуа $GF(q)$. Поэтому в данном коде имеется всего $(q-1)^2$ ошибок весом 1; двойных – $C_{q-1}^2 (q-1)^2$ ошибок весом $\omega \geq 1 - C_{q-1}^\omega (q-1)^\omega$, что в $(q-1)^\omega$ раз больше, чем у двоичного БЧХ-кода той же длины. Очевидно, с ростом N и ω количество исправляемых РС-кодом ошибок стремительно растёт, векторы-ошибки весом, меньшим D обнаруживаемы кодом $RS(N, K)$ и исправляемы, если их вес $t \leq (D-1)/2$ для нечетных D и $t \leq (D-2)/2$ для чётных значений D [1].

Понятие автоморфизмов в помехоустойчивом кодировании введено с сильной оглядкой на двоичные коды [1, глава 8]: это перестановки координат векторов, переводящие все кодовые слова в кодовые. В [6] доказано, что РС-код с проверочной матрицей (1) является циклическим потому, что оператор циклического сдвига σ , который действует на каждый вектор $\bar{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N) \in V_N(GF(q))$ по правилу: $\sigma(\bar{e}) = (e_N, e_1, e_2, \dots, e_{N-1})$, кодовые слова кода $RS(N, K) = RS(q-1, q-\delta)$ преобразует в кодовые. Степени σ составляют циклическую группу $\Gamma = \{\sigma, \sigma^2, \dots, \sigma^N = e\}$ порядка N для тождественного оператора e .

К принципиально иному типу автоморфизмов РС-кодов следует отнести аффинные подстановки или гомотетии, то есть преобразования $f_\gamma: \bar{x} \rightarrow \gamma \bar{x}$ векторного пространства $V_N(GF(q))$ – пространства ошибок кода $RS(N, K) = RS(q-1, q-\delta)$ [6].

Преобразования f_γ образуют группу A относительно операции композиции отображений, изоморфную циклической группе $GF(q)^*$ порядка $q-1$. В силу цикличности группа A имеет следующую структуру: $A = \langle f_\alpha \rangle = \{f_\alpha, f_{\alpha^2}, \dots, f_{\alpha^{q-1}} = e\}$ для примитивного элемента α поля $GF(q)$, образующей мультипликативной группы $GF(q)^*$.

Не сложно проверить, что операторы f_γ и σ коммутируют друг с другом: $\sigma f_\gamma = f_\gamma \sigma$, что пе-

ресечение $\Gamma \cap A = \{e\}$. Отсюда следует, что минимальная подгруппа в группе $Aut(RS(N, K))$ автоморфизмов РС-кода, содержащая A и Γ , совпадает с их прямым произведением $A\Gamma$ и является группой порядка $(q-1)^2$.

Перечисленные автоморфизмы порождают три различных класса орбит векторов-ошибок в РС-кодах: A -орбиты, Γ -орбиты и $A\Gamma$ -орбиты.

Для всякого вектора $\bar{e} \neq \bar{0}$ из пространства $V_N(GF(q))$ порожденная им A -орбита $\langle \bar{e} \rangle_A$ имеет следующую структуру:

$$\langle \bar{e} \rangle_A = \{\bar{e}, f_\alpha(\bar{e}), f_{\alpha^2}(\bar{e}), \dots, f_{\alpha^{N-1}}(\bar{e})\} = \{\bar{e}, \alpha \bar{e}, \alpha^2 \bar{e}, \dots, \alpha^{N-1} \bar{e}\}.$$

Все A -орбиты, порожденные ненулевыми векторами, являются полными – содержат максимально возможное число векторов, имеют мощность N . Γ -орбита $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$, порожденная этим же вектором, имеет похожую циклическую структуру:

$$\langle \bar{e} \rangle_\Gamma = \{\bar{e}, \sigma(\bar{e}), \sigma^2(\bar{e}), \dots, \sigma^{N-1}(\bar{e})\},$$

где v – наименьшее целое положительное число с условием: $\sigma^v(\bar{e}) = \bar{e}$. Когда $v = N$ Γ -орбита также содержит максимально возможное количество векторов и потому является полной. Значение $v < N$ также возможно, реализуется, когда вес вектора является делителем числа N . К примеру, в пространстве $V_{15}(GF(2^4))$ вектор $\bar{e} = (\alpha, 0, 0, \alpha, 0, 0, \alpha, 0, 0, \alpha, 0, 0, \alpha, 0, 0)$ с примитивным элементом $\alpha \in GF(2^4)$ порождает, очевидно, Γ -орбиту мощностью $v = 3$.

Каждая $A\Gamma$ -орбита $\langle \bar{e} \rangle_{A\Gamma}$ состоит из $v(q-1)$ векторов для $v = N$ или для v , делящего N , и, в силу взаимной коммутативности подстановок σ и f_γ , имеет следующую структуру:

$$\langle \bar{e} \rangle_{A\Gamma} = \{\langle \bar{e} \rangle_A, \langle \sigma(\bar{e}) \rangle_A, \dots, \langle \sigma^{v-1}(\bar{e}) \rangle_A\}$$

или

$$\langle \bar{e} \rangle_{A\Gamma} = \{\langle \bar{e} \rangle_\Gamma, \langle (\alpha \bar{e}) \rangle_\Gamma, \dots, \langle (\alpha^{q-2} \bar{e}) \rangle_\Gamma\}.$$

Таким образом, $A\Gamma$ -орбиту можно рассматривать как объединение N Γ -орбит, переходящих друг в друга под действием автоморфизма f_α или же как объединение v A -орбит.

Если K – множество всех корректируемых РС-кодом векторов-ошибок мощностью $|K|$, то оно разбивается на множество Γ -орбит K_Γ или A -орбит K_A . Как правило, будем рассматри-

вать наиболее крупные орбиты – АГ-орбиты. Подавляющее большинство АГ-орбит является полным – содержит по N^2 векторов-ошибок, поэтому мощность $|K_{AG}|$ примерно равна величине $|K|/N^2$.

Спектры синдромов орбит ошибок в РС-кодах

Приемное устройство инфокоммуникационной системы (ИКС), работающее на основе РС-кода, проверяет каждое принятое сообщение $\bar{x}$ на наличие ошибок вычислением синдрома $S(\bar{x}) = H\bar{x}^T$. В соответствии со структурой проверочной матрицы (1) или (2) синдром представляет собой вектор $S(\bar{x}) = (s_1, s_2, \dots, s_{\delta-1})$ с $\delta-1$ координатами из поля $GF(q)$. Синдром $S(\bar{x})$ может быть любым вектором $\delta-1$ -мерного пространства над полем $GF(q)$. Таким образом, в РС-коде имеется $q^{\delta-1}$ различных синдромов векторов-ошибок. Если $S(\bar{x}) = 0$, то $\bar{x} = \bar{c}$ – правильное кодовое сообщение. Если же $S(\bar{x}) \neq 0$, то $\bar{x} = \bar{c} + \bar{e}$, где $\bar{e}$ – наложившийся на правильное сообщение $\bar{c}$ ненулевой вектор ошибок, подлежащий дальнейшей идентификации.

Из-за большого разнообразия спектра синдромов у РС-кодов некоторые привычные для двоичных БЧХ-кодов свойства синдромов здесь могут нарушиться. К примеру, у двоичных кодов Хемминга и БЧХ-кодов первая компонента синдрома любой двойной ошибки всегда отлична от нуля. У кодов же $RS(N, K)$ с проверочной матрицей (1) или (2) всегда найдутся примеры векторов-ошибок $\bar{e}$ весом 2 и с компонентой $s_1 = 0$ у синдрома $S(\bar{e}) = (s_1, s_2, \dots, s_{\delta-1})$.

Более того, для каждого целого i , $1 \leq i \leq \delta-1$, найдётся вектор $\bar{e}_i$ весом 2 с компонентой синдрома $s_i = 0$. Например, вектор-ошибка $\bar{e}_i = (\alpha^i, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ с 1 на $i+1$ -ом месте в коде $RS(N, K)$ с проверочной матрицей (2). Однако, имеет место.

Лемма 1. В коде $RS(N, K)$ с проверочной матрицей (2) не существует векторов-ошибок весом 2, синдромы которых имели бы две компоненты, равные 0.

Доказательство методом от противного. Предположим, что такая вектор-ошибка $\bar{e}$ с компонентами $s_\mu = 0$, $s_\nu = 0$, $1 \leq \mu < \nu \leq \delta-1$, всё-таки существует $\bar{e} = (0, \dots, 0, x, 0, \dots, 0, y, 0, \dots, 0)$ с неизвестными координатами $x, y \in GF(2^m)^*$ на неопределённых позициях i, j , $1 \leq i < j \leq N$.

Компоненты s_μ и s_ν получаются умножением μ -ой и ν -ой строк матрицы (2) на вектор $\bar{e}$:

$$\begin{cases} s_\mu = \alpha^{(i-1)\mu} x + \alpha^{(j-1)\mu} y = 0; \\ s_\nu = \alpha^{(i-1)\nu} x + \alpha^{(j-1)\nu} y = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Полученные равенства можно рассматривать как систему линейных однородных уравнений относительно неизвестных x и y . Определитель системы

$$\Delta = \alpha^{(i-1)\mu} \alpha^{(j-1)\nu} + \alpha^{(i-1)\nu} \alpha^{(j-1)\mu} = \alpha^{\nu(i-1) + \mu(j-1)} (1 + \alpha^{(\nu-\mu)(j-i)}) \neq 0.$$

По правилу Крамера данная система должна иметь единственное, а, следовательно, нулевое решение: $x = y = 0$. Но тогда вес вектора $\bar{e}$ равен нулю. Полученное противоречие завершает доказательство леммы.

Следствие 1. У синдрома любой двойной ошибки не менее $\delta-2$ компонент отличны от нуля (все $s_i \neq 0$, за исключением, может быть, одной).

Конечно же, базовые свойства синдромов сохраняются и для РС-кодов. В том числе и такое свойство, как попарное различие синдромов у любой декодируемой совокупности векторов-ошибок, как например, попарное различие синдромов одиночных и двойных ошибок в РС-коде с проверочной матрицей (2).

Синдромы векторов-ошибок под действием на эти векторы автоморфизмов РС-кодов изменяются по строго определённым правилам.

Предложение 1.

Пусть $S(\bar{e}) = (s_1, s_2, \dots, s_{\delta-1})^T$ – синдром вектора-ошибки $\bar{e}$ в РС-коде с проверочной матрицей (1). Тогда для автоморфизма циклического сдвига σ вектор $\sigma(\bar{e})$ имеет синдром

$$S(\sigma(\bar{e})) = (\alpha^{\delta-1} s_1, \alpha^{\delta-2} s_2, \dots, s_{\delta-1}). \quad (4)$$

Если РС-код задан проверочной матрицей (2), то

$$S(\sigma(\bar{e})) = (\alpha s_1, \alpha^2 s_2, \dots, \alpha^{\delta-1} s_{\delta-1}). \quad (5)$$

В РС-коде с проверочной матрицей (1) или (2) синдром

$$S(f_\gamma(\bar{e})) = (\gamma s_1, \gamma s_2, \dots, \gamma s_{\delta-1}) = \gamma S(\bar{e}). \quad (6)$$

Доказательство. Пусть код задан проверочной матрицей (1). Пусть у вектора $\bar{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N)$

отличны от нуля координаты с номерами $i_1, i_2, \dots, i_s$. Тогда для целого $i, 1 \leq i \leq \delta-1$, компонента s_i синдрома $S(\bar{e}) = (s_1, s_2, \dots, s_{\delta-1})^T$ является результатом умножения i -ой строки матрицы (1) на вектор $\bar{e}$ и есть величина

$$s_i = \alpha^{(b+i-1)(i_1-1)} e_{i_1} + \alpha^{(b+i-1)(i_2-1)} e_{i_2} + \dots + \alpha^{(b+i-1)(i_s-1)} e_{i_s}.$$

У вектора $\sigma(\bar{e})$ ненулевыми будут координаты с номерами $i_1+1, i_2+1, \dots, i_s+1$, соответственно равные $e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_s}$. Поэтому у вектора $S(\sigma(\bar{e})) = (s_1^\sigma, s_2^\sigma, \dots, s_{\delta-1}^\sigma)^T$ i -я компонента

$$s_i^\sigma = \alpha^{(b+i-1)i_1} e_{i_1} + \alpha^{(b+i-1)i_2} e_{i_2} + \dots + \alpha^{(b+i-1)i_s} e_{i_s} = \alpha^{b+i-1} (\alpha^{(b+i-1)(i_1-1)} e_{i_1} + \alpha^{(b+i-1)(i_2-1)} e_{i_2} + \dots + \alpha^{(b+i-1)(i_s-1)} e_{i_s}) = \alpha^{b+i-1} s_i,$$

что доказывает формулу (4). Формула (5) является частным случаем формулы (4). Формула (6) следует из свойств линейности синдрома и векторно-матричных вычислений: $S(\gamma\bar{e}) = \gamma S(\bar{e})$.

Следствие 1. Если у синдрома $S(\bar{e}) = (s_1, s_2, \dots, s_{\delta-1})^T$ какая-нибудь из компонент $s_i = 0$ ($s_i \neq 0$), то этим же свойством обладают и все i -е компоненты всех векторов-ошибок из АГ-орбиты, которой принадлежит вектор $\bar{e}$.

Доказательство следствия непосредственно вытекает из формул (4)–(6).

Определение 1. Множество всех попарно различных синдромов каждой отдельно взятой орбиты векторов-ошибок называется синдромным спектром этой орбиты.

Формулы (4)–(6) показывают, что спектры синдромов каждой отдельно взятой Г-орбиты или А-орбиты имеют четко очерченную структуру, синхронно копирующую циклическую структуру самих орбит (для α – образующей группы $GF(2^m)^*$):

$$S(\langle \bar{e} \rangle_\Gamma) = \{ \alpha^i s_1, \alpha^{2i} s_2, \dots, \alpha^{(\delta-1)i} s_{\delta-1} \}, \quad (7) \\ 0 \leq i \leq v-1, v = N \text{ или } v \text{ делит } N.$$

$$S(\langle \bar{e} \rangle_A) = \{ \alpha^i s_1, \alpha^i s_2, \dots, \alpha^i s_{\delta-1} \}, 0 \leq i \leq N-1. \quad (8)$$

Предложение 2. Пусть код $RS(N, K)$ задан проверочной матрицей (2), а вектор-ошибка $\bar{e} \neq 0$, но и не является кодовым словом. Тогда А-орбита $\langle \bar{e} \rangle_A$ является полной с полным спектром синдромов $S(\langle \bar{e} \rangle_A)$, то есть $|S(\langle \bar{e} \rangle_A)| = |\langle \bar{e} \rangle_A| = N$.

Если Г-орбита $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$ имеет полный спектр синдромов (то есть мощность $|S(\langle \bar{e} \rangle_\Gamma)| = N$), то и Г-орбита $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$ является полной: $|\langle \bar{e} \rangle_\Gamma| = N$.

Пусть Г-орбита $\langle \bar{e} \rangle_\Gamma$ имеет мощность v , равную N или делящую N , спектр синдромов которой также равен v . Тогда орбита $\langle \bar{e} \rangle_{AG}$ имеет мощность vN со спектром синдромов $S(\langle \bar{e} \rangle_{AG})$ мощностью vN .

Доказательство. В условиях предложения 2 $S(\bar{e}) \neq 0$. А это означает, что по крайней мере одна из компонент $s_i \neq 0$ у синдрома $S(\bar{e})$. Тогда множество $\{ \alpha^i s_j, 0 \leq j \leq N-1 \}$ имеет мощность N . В силу формулы (8) этот факт приводит к выводу, что спектр синдромов $S(\langle \bar{e} \rangle_A)$ также имеет мощность N .

Заключение

Синдромы являются основным индикатором наличия ошибок в каждом принятом ИКС сообщении, средством точной идентификации этих ошибок. Исследована специфика синдромов двойных ошибок в РС-кодах. Циклические и аффинные подстановки на РС-кодах порождают на них три вида групп автоморфизмов: Г, А и АГ. Соответственно определяются три вида орбит векторов-ошибок. Описана специфика спектров синдромов этих орбит ошибок. Показано, что эти спектры, как правило, являются полными. Структура спектров синдромов копирует структуру самих орбит, которые в свою очередь копируют структуру соответствующих групп автоморфизмов кода. Полученные результаты являются существенным вкладом в построение ТНС для кодов Рида-Соломона.

ЛИТЕРАТУРА

1. McWilliams F. J., Sloan J. J. The Theory of Error-Correcting Codes. – Amsterdam: North-holland publishing company; 1977. – 762 s.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2. – Москва: Вильямс; 2003–1104 с.
3. Кудряшов Б. Д. Основы теории кодирования. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2016 – 400 с.
4. Маров А. В., Утешев А. Ю. Матричный формализм кодов Рида-Соломона // Вестник Санкт-Петербургского университета, Сер 10. Вып. 4. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2016 – С. 4–17.

5. Липницкий В. А., Конопелько В. К. Норменное декодирование помехоустойчивых кодов и алгебраические уравнения. – Минск: БГУ; 2007. – 239 с.
6. Липницкий В. А., Семёнов С. И. Автоморфизмы и орбиты ошибок кодов Рида-Соломона // Доклады БГУИР. Вып. 6 – Минск: БГУИР, 2019.

REFERENCES

1. McWilliams F. J., Sloan J. J. The Theory of Error-Correcting Codes. – Amsterdam: north-holland publishing company, 1977. – 762 s.
2. Sclyar B. Digital communications. Fundamentals and Applications. Ed. 2. – Moscow: Wil'ams; 2003–1104 s.
3. Kudryashov B. D. Fundamentals of coding theory. – St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2016–400 s.
4. Marov A. V., Uteshev A. Y. Matrix formalism of Reed-Solomon codes // Vestnik Saint-Petersburgskogo universiteta, Ser.10, V.4. – St. Petersburg: BHV-Petersburg; 2016 – s. 4–17.
5. Lipnitsky V. A., Konopelko V. K. Norm decoding of noise-resistant codes and algebraic equations. – Minsk: BGU; 2007–239 s.
6. Lipnitsky V. A., Semyonov S. I. The automorphisms and error orbits of Reed-Solomon codes // Doklady BGUIR V. 6 – Minsk: BGUIR, 2019. (In Russ.)

Поступила
20.01.2020

После доработки
25.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

LIPNITSKI V. A., SEMYONOV S. I.

SYNDROME SPECTRUMS OF ERROR ORBITS IN RS-CODES

Military academy Republic of Belarus

This article is devoted to the research of the properties of syndromes of errors in Reed-Solomon codes. RS-codes are built on non-binary alphabets. So, unlike BCH-codes, RS-codes contain an extremely large variety of correctable errors. To correct these errors, a systematic application of automorphisms of codes is proposed. Characteristic automorphisms of RS-codes are cyclic and affine substitutions forming cyclic groups Γ and A whose orders coincide with the code length. Cyclic and affine substitutions commute with each other and generate a joint $A\Gamma$ group, what is the product of subgroups A and Γ . These three groups act on the space of error vectors of RS-codes, breaking this space into three types of error orbits. As a rule, these orbits are complete and contain the maximum possible number of errors. Syndromes are the main indicator of the presence of errors in each message received by the information system, a means of accurately identifying these errors. The specificity of syndromes of double errors in RS-codes is investigated. Determined that syndrome spectrums of error orbits are also complete in most cases. Proved that the structure of the syndrome spectrums copies the structure of the orbits themselves, which in turn copy the structure of groups of code automorphisms. The results obtained are a significant contribution to the construction of the theory of syndrome norms for RS-codes.

Keywords: linear code, RS-code, error syndromes, automorphisms of codes, cyclic substitution, affine substitution, orbits of error vectors.



Липницкий Валерий Антонович, профессор, доктор технических наук.
Lipnitski V. A., Doctor of technical sciences, professor.
E-mail: valipnitski@yandex.by.



Семёнов Сергей Иванович, адъюнкт кафедры информационно-вычислительных систем Военной академии Республики Беларусь
Semyonov S. I., the adjunct of chair of information and computing systems of Military academy Republic of Belarus.
E-mail: semyonov4213@gmail.com.

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

УДК 621.9.048.7

A. I. LOIKO

INTERDISCIPLINARY STRUCTURE ANALYSIS SYSTEMS IN THE FIELD OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES

Belarusian National Technical University

The article discusses the methodological strategies of integrated computer logistics in the field of artificial intelligence, focused on the tasks of the cognitive economy. The mechanism of the methodological synthesis of disciplinary structures into the system of cognitive sciences and the advantages research programs arising from this mechanism are shown.

Keywords: artificial intelligence, information technology, cognitive activity, system of meanings, generative linguistics, neurons, neural network, thinking model, the fourth industrial revolution.

Introduction

In a relatively short time of technological evolution, information technology has been transformed into artificial intelligence technology. Computer programs capable of self-learning, independent search for solutions to problems, and decision making have been developed. Software development is accompanied by scientific research through an interdisciplinary cluster of cognitive sciences. This cluster integrates mathematical logic, cognitive psychology, cognitive linguistics, neurophilosophy, neurophysiology, neurobiology, anthropology, philosophy of consciousness, artificial intelligence theory, cognitive management, cognitive economics, neuromarketing, Internet logistics of technology platforms, modeling methodology. Key positions in this research cluster are retained by cybernetics, focused on management tasks.

Strong artificial intelligence is developed on the basis of computer evolution programs. A direction of development was formed on the basis of evolutionary genetic and neural approaches. The thesis is used that human thinking and the brain have mental representations similar to computer data structures and computational procedures similar to computational algorithms. Since the human brain is identical to the computer in the content of processes in the form of calculations, the priority in the development of artificial intelligence is given to the simulation of cognitive pro-

cesses that take place in the human brain. At the same time, the principle of demarcation between artificial intelligence and the decision-maker is maintained. Artificial intelligence is designed to make decisions, but not to make them, because subjective experience and will remain the competencies of people. The article discusses the methodological strategies of integrated computer logistics in the field of artificial intelligence, focused on the tasks of the cognitive economy.

Main part of the study

Information technology was created in the twentieth century on the basis of the paradigm of functionalism. According to this paradigm, the description of functional properties and relationships is logically independent of the description of physical properties and relationships. This means that the same functions can be reproduced on substrates with different properties. In this context of consideration, human thinking is similar to mathematical calculation. It was only necessary to develop, within the framework of formal logic, the programming mechanisms necessary for the transformation of natural language statements into statements of an artificial language, one of the modifications of which is the language of mathematical calculi. Mathematical logic coped with this task. Human thinking was formalized on the basis of a specific set of functions for processing information, storing and transmitting

information. At this stage, algorithms were developed for solving specific computational problems related to statistics, costing, document management, design and construction. Human thinking was freed from routine arithmetic calculations similar to the function of a calculator. After the computers were combined into an information network, they began to perform the function of transmitting and receiving information (feedback). It turned out to be relevant in the face of increased volumes of information necessary for decision-making. It was the beginning of cybernetics.

Information technology developers wanted to transfer more functions of human thinking to computer technologies. This means that in the description of the function of thinking it was necessary to introduce features of human consciousness. That was the beginning of the methodology of simulation modeling of information processing functions in the human mind. For this purpose, the categorial apparatus of cognitive science has been updated. He became the basis of the paradigm of cognitive sciences. The initial thesis of this paradigm is that people act on the basis of cognitive codes. Their behavior is a causal consequence of operations performed on the basis of these codes.

As a result of cognitive activity, a system of meanings (concepts fixed by the word) is created, which refers to the fact that the individual knows and thinks about the world. In a systematic form, these meanings are represented by a mentality, which is understood as a stable set of attitudes and predispositions of an individual or social group to perceive the world in a certain way. Mentality reflects the style of thinking, as well as mental attitude, national character, attitudes, values, behavior, activities, mental processes.

The subject of cognitive linguistics is the processes of perception, categorization, classification and understanding of the world, the accumulation of knowledge, that part of the information that is reflected and fixed in the forms of language. Frames (stereotypical situations, scenarios), concepts (the totality of all meanings expressed by the means of the language), aestaltes (integral additional images of fragments of the world) became the instruments of operation. The language sign system plays a role in coding and transformation of information. Categorization develops concepts in which the most relevant properties for everyday consciousness are concentrated. Genera-

tive (transformational) linguistics of N. Chomsky has become one of the grounds for creating a new generation of computer programs that take into account the characteristics of subjective reality [1]. Its essence is that transformational and structural rules, principles describe the creation and interiorization of language expressions. Using a finite set of grammar rules and concepts, people can create an unlimited number of sentences. The ability to structure expressions is an inherent part of the genetic program of humans. They are practically unaware of these structural principles. People only need to learn lexical units and morphemes in order to construct expressions. Understanding the language is not due to past experience of behavior, but to the mechanism of language acquisition (internal memory structure).

J. Fodor developed the theory of human brain activity with the concept of modularity of consciousness [2]. According to this approach, the human cognitive system consists of a central processor and modules. Central processors (conclusions) have access to the entire cognitive system of a person. They form censorship mechanisms. These mechanisms are culturally determined. Information that does not fit into cultural models does not reach the human mind, as it is censored. Censored (recognition, identity procedures) information is divided into modules (fragments). In the general semantic picture, it is collected only in the central processor. Information is structured to fit the cultural program. From the standpoint of connectionism, the mental activity of the brain is modeled through the distribution of activation signals between simple computational units (neurons), which it possible in conditions of fuzzy or insufficient data, contextually dependent concepts, and dynamic representations. Neurons can enter quantitatively measured states of activation and measure the weight of connections with each other, creating complex systems, configurations, described by a mathematical apparatus. Each configuration described by a mathematical vector is a representation of a mental state. A neural network, unlike computers of linear architecture, practically does not need preliminary programming. She is capable of self-learning, as a result of which she performs the functions of generalization, classification, prediction, speech recognition, images, memory research, learning processes. In 2010, the Image Net database was devel-

oped. It contains 15 million images in 22 thousand categories. Based on such a database, a neural network is capable of making practically error-free decisions.

Despite the successes in the field of artificial intelligence theory, computer programs in the field of cybernetics only contribute to human decision making. He remains the main actor. There was a rejection of the thesis about the isomorphism of a computer program and human consciousness. As a result, cognitive sciences have focused on the connection of the human psyche with the functions of his brain. Physicalism, psychologism, and functionalism were combined. The result of concentration of efforts was neuropsycholinguistics.

A statement is formulated that organisms use internal representations (representations) and perform computational operations on them [3]. Cognition in this sense is the controlled manipulation of representations.

The developers of the theory of behavioral economics and neuromarketing began to believe that the understanding of the situation and decision-making by individuals is formed by mechanisms of unconscious thinking. D. Kahneman believes that the role of rational judgment is overestimated [4]. It focuses only a small part of the perceived information, reaching the stage of analysis. In many cases, a judgment on a positive outcome of a choice is made on the basis of a subjective opinion of its correctness, without taking into account real facts. Reflective thinking systems are knowledge-based. Impulsive thinking systems are based on off-the-shelf schemes.

The unconscious thinking model is preferred because it is highly effective due to the low consumption of intellectual resources. No additional cognitive effort is required. Activation of ready-made patterns of social relations occurs without the participation of consciousness (automatic thinking). When there are many variables, the brain performs mental tasks better without the participation of consciousness. When there are few variables and the solution of the problem is reduced to the simplest logical operations, conscious thought works. As a result, unconscious thought is wider than conscious thought due to the limited capacity of working memory. The neural system is a biological carrier and a causal generator of mental states. These conditions are identical

to neural states. The spatial and environmental organization of the human nervous system is ontologically integrated into the brain and generates neural and mental states. A particular individual is a carrier of a mentalized brain.

Formalization of decision-making processes is designed to ensure decision-making, but not to replace them. First of all, it is supposed to support decision-making based on poorly structured information; assessment of the situation and assessment of alternatives. A multi-criteria hierarchical assessment of the situation is implemented. The analysis of influences in the management of poorly structured situations is carried out. Provides intelligent support for management decisions involving intelligent. Methods of formation of enterprise development scenarios are used. Experts, analysts use ideas about the processes occurring in dynamic situations at the enterprise. They use scenarios for the development of the situation in the enterprise in rapidly changing conditions and correlations.

The fourth industrial revolution formulated the trend of a digital society based on the network structures of artificial intelligence. One of the conditions of this trend is the compatibility of all participants in social communication. The infrastructure of crowd platforms has been created. It is a place of updating the creative resources of society. Project applicants through crowd platforms have the opportunity to dialogue with potential investors and donors. If in a timely manner the project is gaining the necessary financial support, then it becomes innovative. According to this technique, the commercial crowdfunding platform «Ulej» (Ulej.by) operates in Belarus. Information support for startups is provided by the BTW-Portal of the creative industry. He also provides information support for projects.

One of the first issues of the creative industry in Belarus began to be considered by I. Matsevich [5]. She traced the evolution of social communities in a new paradigm. The conceptual apparatus used was developed in English-language studies on the creative industry («creative city» C. Landry) [6], «cluster» [7]). The subject of discussion was the importance of clusters in the field of creative economy for the development of social communities in the city. An important part of this process is the formation of the information environment of the cognitive economy and the mechanisms of functioning of cyber-physical systems.

Elements of the cognitive economy are «smart enterprise», «smart city» [8]. The basis of management practices is formed by methods and models of artificial intelligence, intelligent information systems, decision support systems, intelligent data processing. Intelligent production planning systems, dynamic expert systems for dispatching enterprise management, financial analysis and planning using neural networks and evolutionary algorithms, as well as intelligent investment portfolio management and risk management systems are used. An important explanation is the nature of the evolution of organizations and social institutions under structural uncertainty.

The basis is an understanding of the mental activity of a person and a model from the field of cognitive sciences. An interdisciplinary concept of heterodox economic theory has been formed. This theory integrated the sections of cognitive, experimental, and behavioral economies [9]. Formed business analytics, data mining, text mining, web mining, business intelligence. Hybrid intelligent systems have been developed that analyze the consciousness and logic of an expert. They consist of cognitive and analytical levels. The cognitive level provides information for processing at the analytical level. Cognitive methods of analyzing the consciousness of social agents used, testing is carried out of the quality of decision logic for their brain activity, for parametric tuning of intelligent decision support systems. Methods of pairing forecast models and evaluating unstructured situations are used based on cognitive modeling approaches. Models reproduce all stages of the decision support process – from analyzing the situation to choosing the best alternative. They are designed to support analysts in the face of uncertainty. The expert's knowledge about the situation is modeled in the aspect of his ideas and preferences regarding the control goal and the dynamic properties of the situation. The influence of emotions on decision making, learning processes, decision making in the absence of time is studied. According to the results of research, a whole group of cognitive distortions is classified.

The human-machine system combines the functions of human decision making and artificial intelligence decision making. In the process of creating the conditions for supporting decision-making, computer systems for analyzing situations and the method of cognitive maps used in

them play an important role. Experts and analysts use ideas about processes that occur in dynamic situations modeled by a cognitive map. The importance of a cognitive map of the environment was noticed as early as 1948 by Tolman [10]. In his opinion, it determines the response of the body to the environment. System reconstruction with elements of visual clarity achieved by using diagrams and drawings in mind maps contributes to a better presentation and assimilation of knowledge (Tony Buzan [11]). Concept Maps emphasize the importance of previous experience in creating new concepts (Joseph D. Novak [12], David Ausubel [13]). B. Kosko substantiated the methodology of fuzzy cognitive maps – mathematical models that describe a problem situation and complex weakly structured systems [14]. These models allow you to study the evolution of the situation in terms of self-development, external influences. In the structure of the cognitive map, there are many concepts (vertices), as well as many relationships between concepts (arcs). Concepts are elements of the system under study. The same elements are the relationships between them. As a result, a structural diagram of causal relationships is created. A formalized modeling apparatus allows you to work with quantitative and qualitative data.

The cognitive map contains the basic laws of the observed situation known to the subject in the form of an oriented sign graph. The vertices of the graph are factors, signs, characteristics of the situation. Arcs capture cause-effect relationships between vertices. Fuzzy flow control methods have been developed in geographic information systems. A sectoral approach to modeling processes in local spaces of activity and management is used. Attention is paid to the analysis of complex control input factors, the potential strength of their influence, of their influence on the system parameters. Factors (domains) that have a large number of relationships with other factors are investigated. Factors are found that do not have relationships with other factors (orphan factors). Clusters (subsystems) are distinguished, as well as elements of the hierarchical organization of the cognitive map.

But not only knowledge and information provide effective decision making. An important role is played by the subjective human factor. Therefore, the cognitive economy is the knowledge of

how managers formulate goals, alternatives, how they reflect. Based on this knowledge, neuromarketing strategies are built.

Conclusion

Thus, the interdisciplinary logistics of artificial intelligence is focused on the tasks of ensuring decision-making, as well as on the development of effective computer programs for modeling complexly structured situations in the context of solving economic problems of regions and en-

terprises. In Belarus, this direction of the cognitive economy has become a trend. It is associated with the development of cyber-physical systems, as well as a systematic analysis of social structures based on models of a smart city, smart home and smart enterprise. The Belarusian National Technical University is a structure integrated into the cognitive economy because it has the resources of the Faculty of Information Technology and Robotics, engineering and economic specialties, and the International Institute of Distance Learning.

REFERENCES

1. Chomsky, N. (1957), *Syntactic Structures*, The Hague/Paris: Mouton.
2. Fodor, J. (2008), *LOT 2: The Language of Thought Revisited*, Oxford University Press.
3. Abdikeev, N., Tarasenko, S. (2005), *Cognitive Decision Support System architecture // Cognitive Modeling in Linguistics – The VIII International Conference, Varna, Bulgaria. Proceedings, September 4–11.*
4. Kahneman, D., Tversky, A. (Eds.) (2000), *Choices, Values and Frames*. New York: Cambridge University Press.
5. Matsevich, I. (2009), *Contemporary programs and strategies of cultural policies: socio-philosophical analysis // The International Journal of Interdisciplinary Social Sciences. Vol 4. No 2. – P. 191–200.*
6. Porter, M. (2008), *Local clusters in a global economy // Creative industries / Ed. J. Hartley. Malden. P. 259–268.*
7. Landry, Ch. (2008), *The art of city making*. London.
8. Walliser, B. (2008), *Cognitive Economics*. Springer.
9. Ross, D. (2005), *Economic Theory and Cognitive Science: Microexplanation*. The MIT Press, 2005.
10. Tolman, E. C. (1948), *Cognitive maps in rats and men // Psychological Review. Vol.55, No. 4. P. 189–208.*
11. Buzaa, T. (2010), *Mind Maps for Business*. BBC Publications.
12. Novak, J. D. (1998), *Learning, Creating, and Using Knowledge: Concept maps as facilitative tools for schools and corporations*. Mahwah, N. J.: Lawrence Erlbaum & Assoc.
13. Ausubel, D. (1978). *In defense of advance organizers: A reply to the critics // Review of Educational Research, 48, 251–257.*
14. Kosko B. (1997), *Fuzzy Engineering*. Upper Saddle River NJ: Prentice.

Поступила
19.11.2019

После доработки
06.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

ЛОЙКО А. И.

СИСТЕМЫ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА В ОБЛАСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Белорусский национальный технический университет

В статье рассматриваются методологические стратегии интегрированной компьютерной логики в области искусственного интеллекта, акцентированные на задачах когнитивной экономики. Показан механизм методологического синтеза дисциплинарных структур в систему когнитивных наук и вытекающие из этого механизма преимущества исследовательских программ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, информационные технологии, познавательная деятельность, система значений, генеративная лингвистика, нейроны, нейронная сеть, модель мышления, четвертая промышленная революция.



Alexander Loiko, Professor, Doctor of Philosophy Belarusian National Technical University.

Лойко Александр Иванович, профессор, доктор философских наук, Белорусский национальный технический университет.

E-mail: loiko@bntu.by

УДК 004.942

Ю. Б. ПОПОВА, И. В. ЛЕГЧИЛИН

АДАПТИВНОЕ МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ CATS

Белорусский национальный технический университет

Использование мобильных устройств во всем мире уже стало обыденностью. Существует огромное количество приложений, которые значительно упрощают повседневную жизнь: от простого планирования действий и событий до оплаты товаров при помощи простого касания мобильным устройством терминала. Именно поэтому довольно актуальна проблема внедрения мобильного обучающего приложения в образовательный процесс. Целью данного исследования является повышение эффективности процесса обучения за счет использования адаптивного мобильного приложения CATS. Предлагаемый алгоритм адаптивности позволит создавать уникальную программу обучения, которая будет отталкиваться от имеющихся знаний и уровня восприятия учебного материала обучающимися. В качестве математических методов предлагается использовать анализ экспертных систем. Формализовав информационную модель процессов, которые осуществляют как преподаватель, так и обучающийся, можно автоматизировать определенную часть функций преподавателя, сократить затраты на ручной труд, что позволит более просто осуществлять контроль за учебным процессом, а также сделать процесс обучения более эффективным. Реализация мобильного приложения выполнена в среде Microsoft Visual Studio Community (Mac), язык программирования C#, фреймворк Xamarin. Предлагаемая разработка внедрена в учебный процесс Белорусского национального технического университета, покрывает все основные составляющие процесса обучения, включая работу с электронными учебно-методическими комплексами, прохождение тестов, скачивание требуемой информации. Мобильное приложение позволяет адаптироваться к различным размерам устройств, реализовано с использованием современных технологий с адаптацией для операционных систем Android и iOS.

Ключевые слова: адаптивная обучающая система, LMS, мобильное приложение, Xamarin, адаптивное обучение, контроль знаний, электронный учебно-методический комплекс

Введение

В информационно-технологической среде термин «адаптивная система» относится к процессу, в котором интерактивная система изменяет свое поведение под конкретными пользователями, основываясь на информации, полученной о пользователях, обстоятельствах использования и среде [1].

Одним из популярных видов адаптивности в настоящее время является адаптивность обучающих систем, благодаря которым возможно электронное обучение [2]. Выделяют следующие виды адаптивности таких систем [3]:

- адаптивная навигация, приводящая к изменению параметров макета экрана;
- адаптивность, ориентированная на обучение: способ обучения динамичен и индивидуализирован для каждого обучающегося;
- контентно-ориентированная адаптация, которая может привести к динамическому из-

менению контента. Например, информация о курсе делится на три уровня детализации, и уровень отображается на основе значения некоторого коэффициента;

- интерактивная поддержка для решения проблемы, которая помогает учащимся найти правильное решение на следующем этапе;
- гибкая фильтрация информации, которая помогает предоставить студентам только ту информацию, которая им нужна.

Таким образом, можно сказать, что система адаптирует уровень представления учебного материала к личным способностям и возможностям обучаемого, а также к физическим характеристикам устройства.

Поскольку в настоящее время большую популярность набирают мобильные устройства, представляется актуальной разработка мобильного клиента для адаптивной обучающей системы CATS (англ., Care About The Stu-

dent), разработанной и используемой на факультете информационных технологий и робототехники Белорусского национального технического университета [4].

Математические методы, применяемые в адаптивных обучающих системах

При реализации процесса адаптации в обучающих системах одним из важнейших моментов является выбор математических методов. Анализ литературных источников позволил выделить 4 категории методов, применяемых в адаптивных обучающих системах (АОС).

Первая категория включает методы, основанные на теории экспертных систем и реализующие построение хода курса обучения наряду с интеллектуальным анализом результата опроса обучаемого [5]. Плюсом использования таких методов при разработке АОС является предоставление большого круга способов анализа действий, осуществляемых экспертными системами. К минусам можно отнести сложность наполнения базы знаний и регулировки параметров экспертной системы.

Вторая категория представляет собой математические методы, использующие теорию нечетких множеств и нечеткой логики [6]. АОС, в которых применяются такие методы, зачастую реализуют технологию построения последовательности курса обучения. Основной особенностью таких АОС является адаптивность процесса построения курса обучения с учетом неопределенности уровня знаний обучаемого. К недостаткам таких систем можно отнести сложность в выборе параметров алгоритмов нечеткой логики.

К третьей категории были отнесены методы на основе статистических подходов для решения задачи классификации, например, разбиение обучающихся на кластеры в зависимости от уровня предварительной подготовки [7].

Четвертая категория объединяет методы, основанные на теории эволюционных алгоритмов (генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и т. д.). Основной используемой технологией здесь является интеллектуальный анализ ответов обучаемого. К особенностям таких систем относят их широкое применение в задачах адаптивного контроля знаний [8]. В качестве недостатка выступает отсутствие единого способа обоснования при-

нимаемых решений в искусственных нейронных сетях и проблема сходимости генетических алгоритмов.

В данной работе предлагается программная реализация алгоритма из первой категории для адаптивной составляющей обучающей системы CATS.

Программная реализация мобильного приложения обучающей системы CATS

Для реализации адаптивности мобильного приложения обучающей системы CATS под различные платформы был выбран фреймворк Xamarin, позволяющий проводить разработку приложения сразу под две операционные системы iOS и Android [9]. Среда разработки Microsoft Visual Studio Community (Mac), язык программирования C#. Мобильное приложение разработано при помощи архитектурного паттерна Model-View-ViewModel (MVVM), состоящего из трех компонентов: модели (Model), модели представления (ViewModel) и представления (View). Модель описывает используемые в приложении данные. Представление определяет визуальный интерфейс, через который пользователь взаимодействует с приложением. Модель представления связывает модель и представление через механизм привязки данных.

В настоящее время для свободного скачивания в сети Интернет доступна Android-версия мобильного приложения по адресу <https://educats.bntu.by> посредством выбора соответствующего линка внизу страницы приветствия. После первого запуска мобильного приложения пользователю будут доступны два основных модуля: страница авторизации и страница настроек (рис. 1, копии экрана слева и по центру). При повторном запуске приложения авторизоваться не надо, поскольку будет сразу открываться главная страница приложения (рис. 1, копия экрана справа).

Страница авторизации (рис. 1, копия экрана слева) предполагает наличие учетной записи студента в обучающей системе CATS. Для демонстрационной работы приложения создано шесть тестовых записей с логинами TestStudent10, TestStudent11, TestStudent12, TestStudent13, TestStudent14, TestStudent15. Пароли для этих учетных данных такие же, как логины.

На странице настроек (рис. 1, копия экрана по центру) в качестве языка пользовательского

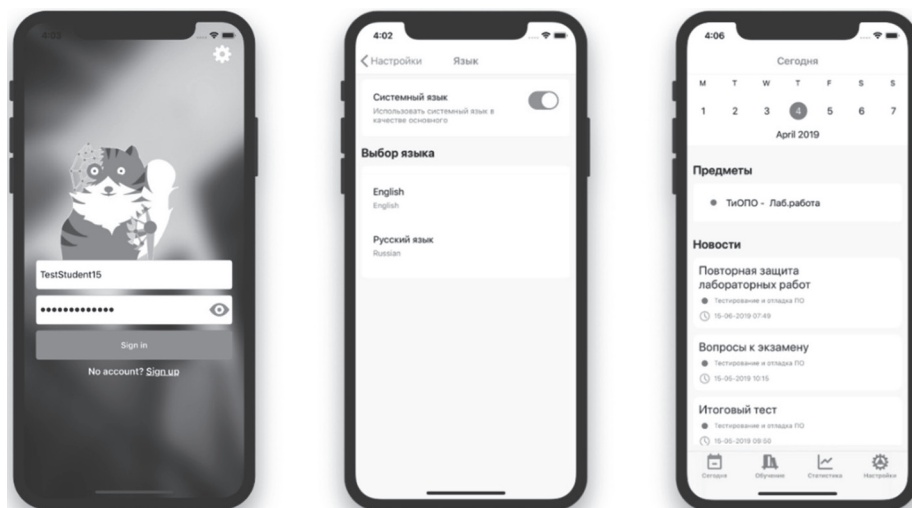


Рис. 1. Страницы авторизации, настроек и главная страница мобильного приложения

интерфейса предусмотрены английский и русский. По умолчанию установлен системный язык устройства.

После авторизации в мобильное приложение обучающей системы CATS можно увидеть главную страницу, которая называется «Сегодня» (рис. 1, копия экрана справа). В верхней части экрана расположен календарь с выделенной текущей датой. В средней части экрана располагаются новости, а также названия предметов, если имеются учебные занятия по ним в текущий день. В нижней части экрана расположено меню мобильного приложения, состоящее из четырех пунктов: Сегодня, Обучение, Статистика и Настройки. При нажатии на каждый из предлагаемых пунктов будет происходить переход на них.

Пункт меню «Обучение» содержит в себе четыре модуля: Тесты, ЭУМК (электронный учебно-методический комплекс), Файлы и Адаптивное обучение (рис. 2, копия экрана слева). При выборе модуля «Тесты» студенту доступен список тестов, которые он может пройти (рис. 2, копия экрана по центру). Это могут быть как тесты для самообучения, которые можно проходить множество раз и рейтинг за них не засчитывается, так и тесты для контроля знаний, используемые преподавателями для контрольной проверки знаний студента [7]. У каждого теста может быть несколько типов вопросов: с одним правильным вариантом ответа (рис. 2, копия экрана справа), с верной последовательностью ответов (рис. 3, копия экрана слева), с несколькими правильными вари-

антами ответов (рис. 3, копия экрана по центру), а также на ввод правильного ответа с клавиатуры. В результате прохождения теста отображается полученная за него оценка с указанием, на какие вопросы были получены верные ответы, а на какие неверные (рис. 3, копия экрана справа).

Модуль «ЭУМК» представляет собой интерактивную книгу (рис. 4). В Республике Беларусь электронные учебно-методические комплексы являются основной составляющей электронного обучения. Процесс разработки ЭУМК, его структурные элементы и разделы регламентированы соответствующим Положением, утвержденным Министерством образования Республики Беларусь [10].

Согласно п. 7 указанного выше документа, ЭУМК, как правило, включает разделы: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный. Так, на рис. 4 представлены страницы ЭУМК для учебной дисциплины «Тестирование и отладка программного обеспечения» с требуемыми составными частями и титульным листом. Выбирая нужный раздел, будет открываться информация для прочтения, а при выборе блока контроля знаний будет реализован переход в модуль тестов.

Модуль «Файлы» предоставляет возможность скачивать прикрепляемые преподавателем файлы (рис. 5). Например, это могут быть вопросы к экзамену, конспекты лекций, рекомендуемый список литературы, методические указания для выполнения практических, лабораторных работ, курсовых проектов, тексты за-

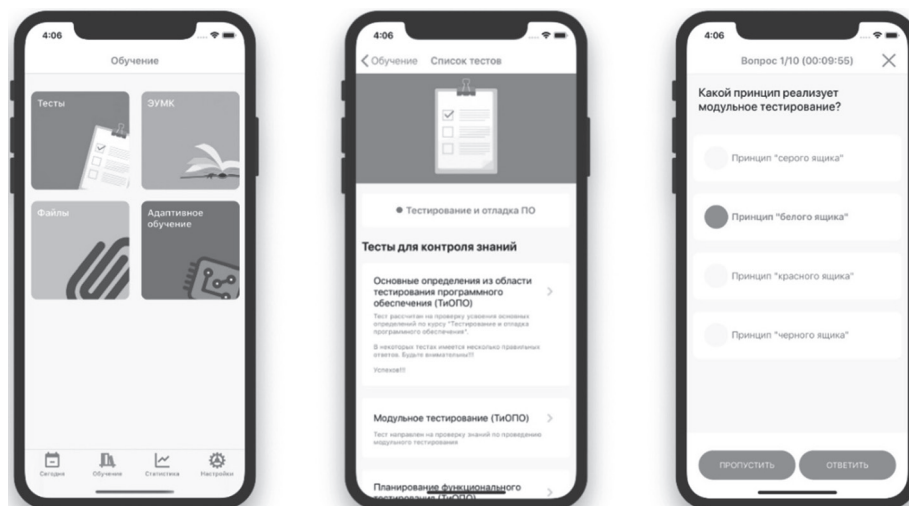


Рис. 2. Страницы пункта меню «Обучение» и модуля «Тесты»

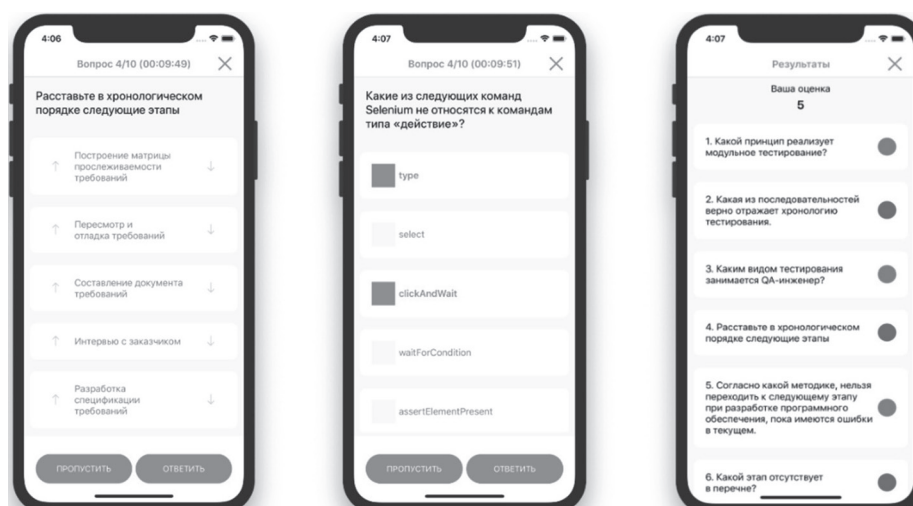


Рис. 3. Типы вопросов в тесте и страница результатов

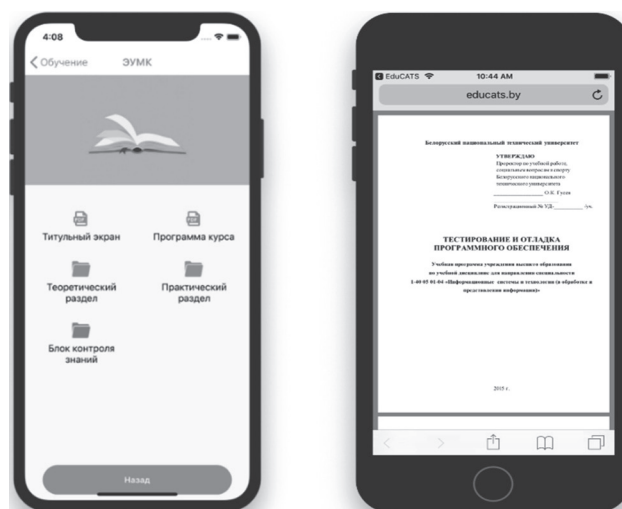


Рис. 4. Страницы электронного учебно-методического комплекса

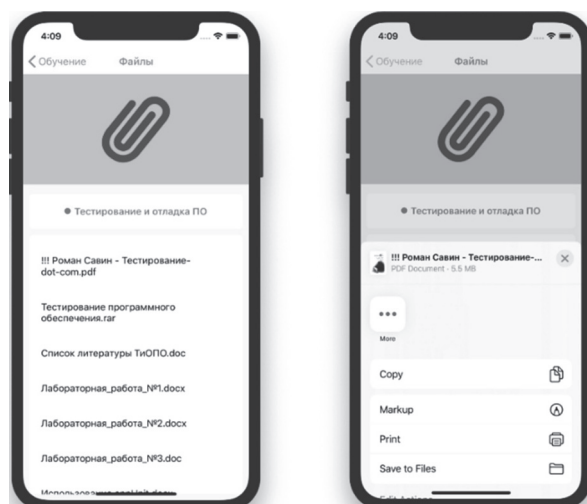


Рис. 5. Страницы для скачивания файлов из мобильного приложения

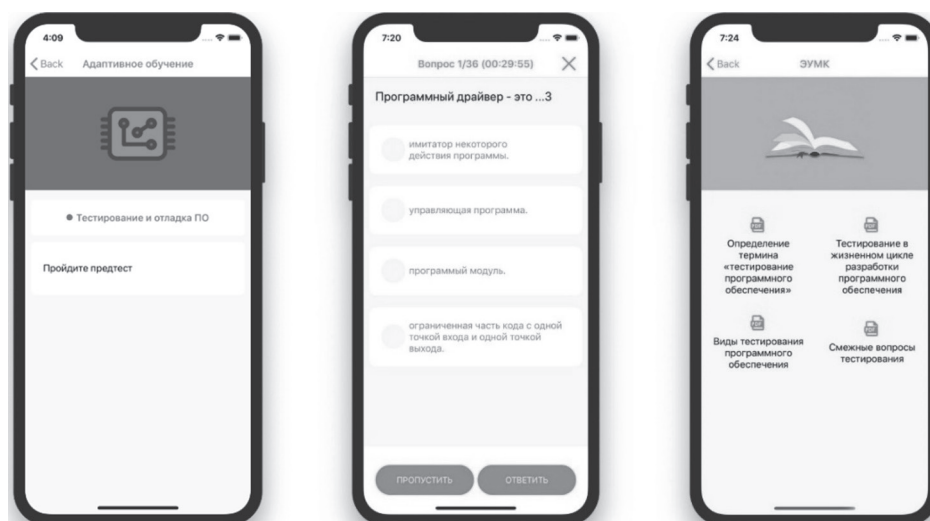


Рис. 6. Страницы для адаптивного обучения в мобильном приложении

даний для этих работ и другая информация. На рис. 5 приведен список файлов для учебной дисциплины «Тестирование и отладка программного обеспечения», которые можно не только скачать, но и поделиться ими.

Модуль «Адаптивное обучение» связывает модули «ЭУМК» и «Тесты». Идея такого подхода направлена на определение пробелов в знаниях студента, согласно следующему алгоритму: на первом этапе обучения студенту предлагается пройти предтест, вопросы которого связаны с концептами (темами, подразделами или разделами) этого учебно-методического комплекса. После окончания теста система анализирует вопросы, отвеченные студентом неверно, и предлагает ему один из материалов для изучения. Затем предлагается пройти тест по этой теме. При успешном прохождении теста система предлагает следую-

щий неизученный материал и тест по нему, в противном случае материал предлагается прочитать еще раз. Алгоритм работает до тех пор, пока студент не изучит все требующиеся темы и не ответит правильно на все вопросы тестов. На рис. 6 приведены страницы адаптивного обучения, реализующие описанный алгоритм для ЭУМК по дисциплине «Тестирование и отладка программного обеспечения». По результатам тестирования предложено изучить тему «Роль и место тестирования в жизненном цикле разработки программного обеспечения».

Пункт меню «Статистика» содержит в себе информацию об успеваемости студента на лабораторных занятиях, а также о его пропусках лабораторных работ и лекций (рис. 7). Так на центральной копии экрана рис. 7 изображена страница с оценками по лабораторным рабо-

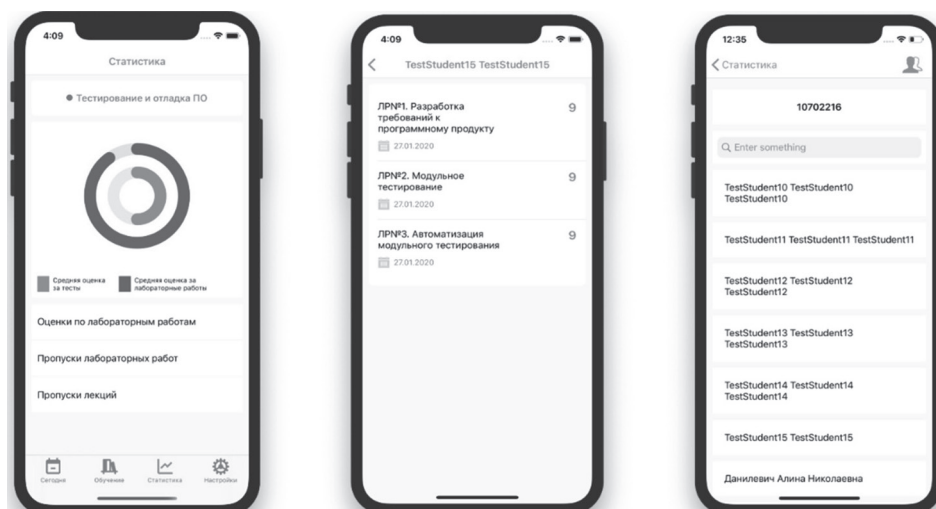


Рис. 7. Страницы пункта меню «Статистика»

там тестового студента TestStudent15, на которой видно, что 27.01.2020 года защищены три лабораторные работы на оценки 9. Каждому студенту доступна информация только о собственных оценках и пропусках, в то время как преподаватель может просмотреть информацию обо всех студентах в группах, в которых он проводит занятия (рис. 7, копия экрана справа).

Страница «Настройки» описывалась выше, однако стоит упомянуть, что после авторизации будет видно полное имя студента и его группа в отдельном блоке. Также появляется кнопка выхода, которая перенаправит пользователя на страницу авторизации и очистит все текущие данные авторизации.

Заключение

Имеющаяся тенденция в направлении непрерывного образования создает перспективную среду для продвижения предлагаемого адаптивного мобильного приложения обучающей системы CATS.

Рассмотренное мобильное приложение обладает следующими особенностями:

- покрывает все основные составляющие процесса обучения, включая работу с электронными учебно-методическими комплексами, прохождение тестов, скачивание требуемой информации;

- информирует участников образовательного процесса об их успеваемости и пропусках занятий;

- учитывает имеющийся уровень знаний каждого обучающегося, реализуя возможность адаптивного обучения;

- позволяет адаптироваться к различным размерам устройств;

- реализовано с использованием современных технологий с адаптацией для операционных систем Android и iOS;

- доступно в сети Интернет, а также в локальной сети Белорусского национального технического университета;

- предлагаемая система протестирована и апробирована на нескольких учебных дисциплинах и активно используется для подготовки инженеров-программистов;

- мобильное приложение постоянно совершенствуется, обновляется и является площадкой для генерирования новых идей. В настоящее время разрабатывается новая функциональность для озвучивания тестов и учебного материала для людей с ограниченными возможностями по зрению;

- функциональные возможности адаптивного мобильного приложения CATS позволяют значительно повысить эффективность процесса обучения.

Литература

1. Брусиловский, П. Л. Адаптивные и интеллектуальные технологии в сетевом обучении / П. Л. Брусиловский // Новости искусственного интеллекта. – 2002. – № 5. – С. 25–31.
2. Попова, Ю. Б. От LMS к адаптивным обучающим системам / Ю. Б. Попова // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 2. – С. 58–64.

3. Левшунов, С. А. Виды адаптивности обучающих систем / С. А. Левшунов, Ю. Б. Попова // Информационные технологии в технических, политических и социально-экономических системах: Материалы МНТК / БНТУ. – Минск: 2018. – С. 19.
4. Попова, Ю. Б. Автоматизированная система управления обучением CATS (Care About The Students) / Ю. Б. Попова // Наука и техника. – 2019. – № 4 (18). – С. 339–349.
5. Стандарты в сфере дистанционного обучения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dist.by/distantcionnoe/16-standarty-v-sfere-distantcionnogo-obucheniya> – Дата доступа: 20.10.2018.
6. Попова, Ю. Б. Представление знаний в обучающих системах на основе теории нечетких множеств / Ю. Б. Попова, А. И. Бураковский // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 2. – С. 58–65.
7. Информационно-коммуникационные технологии в образовании [Электронный ресурс]. – Современные тенденции в кластерном анализе / В. Б. Бериков, Г. С. Лбов. – Режим доступа: <http://www.ict.edu.ru/ft/005638/62315e1-st02.pdf> – Дата доступа: 09.11.2018.
8. Попова, Ю. Б. Применение искусственной нейронной сети для определения степени усвоения учебного материала / Ю. Б. Попова, С. В. Яцынович // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 10 / под общ. ред. А. А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – С. 89–92.
9. Xamarin. Forms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nuget.org/packages/Xamarin.Forms/> – Дата доступа: 11.02.2020.
10. Положение об учебно-методическом комплексе на уровне высшего образования. – Утверждено Министерством образования Республики Беларусь 26.07.2011г. № 167.

REFERENCES

1. Brusilovskij, P. L. Adaptivnye i intellektual'nye tehnologii v setevom obuchenii / P. L. Brusilovskij // Novosti iskusstvennogo intellekta. – 2002. – № 5. – С. 25–31.
2. Popova, Ju. B. Ot LMS k adaptivnym obuchajushhim sistemam / Ju. B. Popova // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2019. – № 2. – С. 58–64.
3. Levshunov, S. A. Vidy adaptivnosti obuchajushhih sistem / S. A. Levshunov, Ju. B. Popova // Informacionnye tehnologii v tehniceskikh, politicheskikh i social'no-jekonomicheskikh sistemah: Materialy MNTK / BNTU. – Minsk: 2018. – С. 19.
4. Popova, Ju. B. Avtomatizirovannaja sistema upravlenija obucheniem CATS (Care About The Students) / Ju. B. Popova // Nauka i tehnika. – 2019. – № 4 (18). – С. 339–349.
5. Standarty v sfere distancionnogo obucheniya [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://dist.by/distantcionnoe/16-standarty-v-sfere-distantcionnogo-obucheniya> – Data dostupa: 20.10.2018.
6. Popova, Ju. B. Predstavlenie znaniy v obuchajushhih sistemah na osnove teorii nechetkih mnozhestv / Ju. B. Popova, A. I. Burakovskij // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2016. – № 2. – С. 58–65.
7. Informacionno-kommunikacionnye tehnologii v obrazovanii [Elektronnyj resurs]. – Sovremennye tendencii v klasternom analize / V. B. Berikov, G. S. Lbov. – Rezhim dostupa: <http://www.ict.edu.ru/ft/005638/62315e1-st02.pdf> – Data dostupa: 09.11.2018.
8. Popova, Ju. B. Primenenie iskusstvennoj nejronnoj seti dlja opredelenija stepeni usvoenija uchebnogo materiala / Ju. B. Popova, S. V. Jacynovich // Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf.: v 12 t. T. 10 / pod obshh. red. A. A. Bol'shakova. – Spb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2018. – С. 89–92.
9. Xamarin. Forms [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.nuget.org/packages/Xamarin.Forms/> – Data dostupa: 11.02.2020.
10. Polozhenie ob uchebno-metodicheskom komplekse na urovne vysshego obrazovanija. – Utverzhdeno Ministerstvom obrazovanija Respubliki Belarus' 26.07.2011g. № 167.

Поступила
17.02.2020

После доработки
29.02.2020

Принята к печати
01.03.2020

Popova Y. B., LEHCHYLIN I. V.

ADAPTIVE MOBILE APPLICATION FOR THE CATS LEARNING SYSTEM

Belarusian National Technical University

Using mobile devices around the world has already become commonplace. There are a huge number of applications that greatly simplify everyday life: from simple planning of actions and events to paying for goods by simply touching the terminal with a mobile device. That is why the problem of introducing a mobile training application into the educational process is quite relevant. The purpose of this study is to increase the efficiency of the learning process through the use of the adaptive mobile application CATS. The proposed adaptability algorithm will allow you to create a unique training program that will build on existing knowledge and the level of perception of learning material for students. It is proposed to use the analysis of expert systems as mathematical methods. By formalizing the intellectual processes that are carried out by both the teacher and the student, it is possible to automate a certain part of the teacher's functions, reduce manual labor costs, which will make it

easier to control the educational process, as well as make the learning process more effective. The software of the mobile application was created in the environment of Microsoft Visual Studio Community (Mac) in C# programming language and Xamarin framework. The proposed development is implemented in the educational process of the Belarusian National Technical University, covers all the main components of the learning process, including working with electronic educational and methodical complexes, passing tests, downloading the required information. The mobile application allows you to adapt to various sizes of devices, implemented using modern technologies with adaptation for Android and iOS operating systems.

Keywords: adaptive learning system, LMS, mobile application, Xamarin, adaptive learning, knowledge control, electronic training complex.



Yuliya B. Popova, PhD, Associate Professor of the Department of software for information systems and technologies at the Belarusian National Technical University.

Попова Юлия Борисовна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий БНТУ.

Email: jpopova@bntu.by



Ilya Lehchylin received the graduate degree in software engineering from the Belarusian National Technical University in 2018. He is currently working on Master's degree program in system analysis and control of information processing.

Легчилин Илья Вадимович закончил Белорусский национальный технический университет по специальности «Программное обеспечение информационных технологий» в 2018 году. В настоящее время является магистрантом кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий БНТУ.

Email: lehchylin.ilya@gmail.com

Работа выполняется в рамках научно-исследовательской работы ГБ № 16–274 «Модели, методы, технологии создания прикладных комплексов для инженерных и компьютерных систем». В марте 2020 года предлагаемое мобильное приложение стало финалистом международного конкурса Black Sea Science (Украина, г. Одесса).