

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА
№ 4, 2018**

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE
No 4, 2018**



**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,
В. А. Мищенко, 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, V. Mishchenko,
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

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

- Захарченков К. В., Мрочек Ж. А., Мрочек Т. В.**
Алгоритм решения многокритериальной задачи пла-
нирования производства труб и фасонных изделий . 4
- Степанов В. Ю., Хвитко Е. А.**
Алгоритм оповещения оператора беспилотного ле-
тательного аппарата на основе выделения на изо-
бражении границ потенциальных препятствий для
полёта с использованием библиотеки OPEN CV 11

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

- Климович А. Н., Шуть В. Н.**
Алгоритм управления перекрестком на основе v2i
взаимодействия..... 21
- Маркевич В. Э., Легкоступ В. В.**
Модифицированный метод пропорциональной на-
вигации для перехвата аэробаллистической цели
при ограниченном секторе наведения ракеты 28

SYSTEM ANALYSIS

- Zakharchenkov K. V., Mrochek Z. A., Mrochek T. V.**
Algorithm for solution of multicriterion problem of
production planning of pipes and shaped products..... 4
- Stepanov V. Y., Hvitko E. A.**
Algorithm for alerting the unmanned aerial vehicle
operator based on the image potential obstacle borders
detection on the flight trajectory using the open cv
library 11

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

- Klimovich A. N., Shuts V. N.**
Algorithm of management of intersection on the basis of v2i
interaction..... 21
- Markevich V. E., Legkostup V. V.**
Modified method of proportional navigation to inter-
cept aeroballistic targets with a limited sector guidance
of missile 28

Пузанов А. В. Трансдисциплинарные модели гидроприводов мобильной техники.....	Puzanov A. V. Transdisciplinary models of hydraulic drives of mobile machinery.....
51	51
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ	DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING
Михайлов В. Г. Использование s-function builder в matlab/simulink ..	Mikhailov V. G. Use s-function builder in matlab/Simulink
57	57
Рудикова Л. В., Мысливец О. Р. О концепции создания системы агрегации и обработки данных пользователей социальных сетей	Rudikova L., Myslivec O. About a concept of creating a social network users information aggregation and data processing system
65	65
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ	INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION
Макарич М. В., Попова Ю. Б., Швед М. А. Лингвистическое и программное обеспечение англо-беларуско-русского словаря технических терминов	Makarych M. V., Popova Y. B., Shved M. O. Linguistic database and software for english-belarusian-russian dictionary of technical terms
74	74
Рылова О. Г. Особенности обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики	Rylova O. Features of training 3d computer modeling and visualization of future teachers of informatics
83	83

Ответственный секретарь редакции

Петренко Ю. Н.

Технический редактор

Лакин В. И.

Адрес редакции

ул. 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

V. Lakin

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

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

Подписано в печать 22.12.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 4,00. Тираж 100 экз. Заказ 1047.

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

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

©Системный анализ и прикладная информатика, 2018

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 004.02: 658.512.6

К. В. ЗАХАРЧЕНКОВ¹, Ж. А. МРОЧЕК², Т. В. МРОЧЕК¹

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ И ФАСОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
Белорусский национальный технический университет*

Одно из современных направлений повышения экономической эффективности предприятия – автоматизация планирования производства, в том числе автоматизированное составление расписания производства продукции. Внедрение готовых решений для автоматизированного составления производственных расписаний (APS, MES-системы) на предприятиях сдерживается сложностью и высокой стоимостью адаптации к условиям конкретного предприятия, внедрения и сопровождения. Сложность решаемой задачи обусловлена большим количеством наименований выпускаемой продукции, быстрым изменением оперативной обстановки и необходимостью четкого взаимодействия со складом. Задача является многокритериальной, поскольку необходимо обеспечить максимальную загрузку каждой производственной линии для выпуска продукции при минимальном количестве переналадок, при этом в расписании должны быть соблюдены сроки отгрузки продукции с учетом наличия исходных материалов для выпуска. Поэтому авторами разработаны алгоритм и программное обеспечение, позволяющие за приемлемое время составить допустимое, часто и оптимальное расписание производства ПИ-трубы и фасонных изделий партиями, с индивидуальным завершением последовательного обслуживания, с учетом производственных и технологических ограничений в ООО «СМИТ-Ярцево» (Россия). При этом выполняется разбиение каждой группы изделий на партии в соответствии с правилом Макнотона (wrap around rule или «правило обертки»), и производится распределение полученных партий по производственным линиям. Для выбора оптимального расписания необходимо составить несколько расписаний с различными значениями числа переналадок, и выбрать из них то, которое в наибольшей степени удовлетворяет критериям задачи.

Ключевые слова: алгоритм, планирование производства партиями, правило Макнотона, переналадка, производственная линия, допустимое расписание, оптимальное расписание

Введение

Планирование производства, предусматривающее составление расписания выпуска продукции с учетом частого изменения оперативной обстановки, является одним из ключевых факторов экономической эффективности функционирования предприятия.

Планирование производства ПИ-трубы (предварительно изолированной трубы), фасонных изделий и комплектующих для теплоизолированных трубопроводов, используемых в жилищно-коммунальном хозяйстве и при прокладке газопроводов, в условиях, сложившихся в ООО «СМИТ-Ярцево» (Российская Федерация, Смоленская область), характеризуется следующими особенностями:

- сезонностью заказов и производства труб (т. к. работы по укладке и ремонту труб имеют сезонный характер). Пик заказов на ПИ-трубу приходится на летние месяцы, зимой ведется работа на склад по наиболее востребованным позициям производимой продукции;
- большим (свыше 20 000) количеством наименований выпускаемой продукции;
- высоким темпом изменения оперативной обстановки во время пика заказов, поэтому временные затраты на составление расписания должны быть небольшими;
- необходимостью четкого планирования поставок со склада материалов и комплектующих для производства труб (каждая позиция заказанной продукции должна быть укомплек-

тована исходными материалами не позднее, чем за 3 дня до отгрузки) [1].

Разработку таких расписаний производства осуществлять вручную менеджеру на основе личного опыта и предпочтений в силу сложности задачи крайне затруднительно, что приводит к неизбежным ошибкам, влекущим за собой сбой в производстве, перерасход исходных материалов, срывы сроков отгрузки заказов. Своевременно выполнять заказы возможно лишь с помощью автоматизированной системы планирования производства с приемлемыми показателями быстроедействия.

Существует ряд готовых решений автоматизированного составления производственных расписаний (APS, MES-системы), однако готовые решения не учитывают специфики конкретного производства, что приводит к значительной стоимости их внедрения и сопровождения; к тому же алгоритмы, полиномиальные по времени выполнения, известны только для достаточно простых задач подобного класса.

Поэтому авторами для ООО «СМИТ-Ярцево» предложен алгоритм и программное обеспечение, позволяющие за приемлемое время решить поставленную задачу.

Алгоритм решения задачи

Перед началом планирования должен быть полностью определен план продаж и производства (который составляется на основе перечня заказанных позиций продукции). В плане должны быть указаны:

- заказанный метраж $Quantity_f$ трубы позиции f , $f \in N$, где N – множество номеров позиций заказанной продукции;
- тип материала $Material_f$, из которого изготовлена труба позиции f (труба может быть стальная или оцинкованная): $Material_f = \{\text{Ст}, \text{Ц}\}$;
- тип заказчика $CustomerType_f$ трубы позиции f . Тип заказчика определяется его местоположением: «М» – заказчики из Москвы и Московской области, «РФ» – из других регионов Российской Федерации, «РБ» – из Республики Беларусь (т. е., $CustomerType_f = \{\text{М}, \text{РФ}, \text{РБ}\}$);
- дата отгрузки для каждой позиции $\{ShipmentDate_f\}$.

План продаж и производства должен быть отсортирован по возрастанию даты отгрузки $ShipmentDate_f$. На основе данного плана со склада должны поступить сведения об укомплектованности заказанных позиций ПИ-трубы.

Для производства ПИ-трубы в ООО «СМИТ-Ярцево» имеются 2 линии. Первая линия ($L = 1$) – линия малых диаметров – позволяет выпускать только трубы малых диаметров (диаметры от 25 до 133 мм). Вторая линия ($L = 2$) – линия больших диаметров – позволяет выпускать трубы любых диаметров (от 25 до 1020 мм). Время $prodTime_f$, затрачиваемое на производство трубы позиции f , представляет собой дискретную функцию $prodTime_f = Quantity_f \cdot W(D_f)$, где $W(D_f)$ – время производства 1 погонного метра трубы, зависящее от диаметра трубы D_f .

Среди производственных и технологических ограничений на последовательность выполнения работ можно выделить следующие:

- 1) ПИ-труба, диаметр которой превышает 133 мм, выпускается на линии больших диаметров, т. е. для $\forall f: D_f > 133, L = 2$;
- 2) оцинкованная ПИ-труба выпускается только на линии малых диаметров, т. е. для $\forall f: Material_f = \text{Ц}, L = 1$;
- 3) ПИ-труба для заказчиков типа «М» выпускается только на линии больших диаметров, т. е. для $\forall f: CustomerType_f = \text{М}, L = 2$;
- 4) время работы каждой линии не должно превышать максимальное количество часов работы $maxTime_L$ линии L ($L = 1, 2$) в сутки, т. е. для $\forall prodDate_f: \sum_f (prodTime_f) \leq maxTime_L$ ($L = 1, 2$);
- 5) количество переналадок $NReset_L$ линии L , запланированное на текущую дату, не должно превышать максимальное количество переналадок $maxNReset_L$ линии L , т. е. для $\forall prodDate_f: Nreset_L \leq maxNreset_L$ ($L = 1, 2$);
- 6) если данная позиция ПИ-трубы не укомплектована (т. е. на складе нет в наличии всех материалов, необходимых для производства), то производство этой позиции ПИ-трубы откладывается на заданное количество дней t_Z .

Необходимо составить расписание производства, в котором для каждой заказанной позиции будут указаны номер линии L для производства ПИ-трубы, расчетная дата $prodDate_f$ выпуска ПИ-трубы позиции f и очередность выпуска продукции.

Критериями оптимальности расписания являются максимум загрузки каждой производственной линии, минимум количества переналадок, допустимость расписания относительно директивных сроков с учетом укомплектованности каждой заказанной позиции и даты отгрузки $ShipmentDate_j$, т. е. решаемая задача является многокритериальной.

Данная задача является детерминированной, поскольку расписание составляется для известного заранее числа работ, определенно-го в плане продаж и производства [2].

Производственные линии образуют обслуживающую систему с групповой технологией обслуживания [3, 4]. При групповой технологии обслуживания требования (заказанные позиции ПИ-трубы) обслуживаются группами (либо партиями), и при переходе от обслуживания одной группы позиций ПИ-трубы с одинаковым диаметром D_f к обслуживанию следующей группы позиций с иным значением D_f необходима переналадка линии.

Решаемая задача представляет собой задачу построения оптимальных расписаний обслуживания требований партиями. Для решения поставленной задачи наиболее рационален математический аппарат, наработанный для класса задач с индивидуальным завершением последовательного обслуживания. Индивидуальное завершение означает, что позиция ПИ-трубы покидает линию в момент, когда на линии завершается технологический процесс изготовления данной позиции. Последовательность обслуживания здесь означает, что все позиции, входящие в одну партию, изготавливаются на линии последовательно, и длительность изготовления партии равна сумме длительностей изготовления входящих в партию позиций. Партии ПИ-трубы имеют ограниченный размер, т. е. верхний предел размера партии ограничен количеством позиций ПИ-трубы, которое можно изготовить за установленное максимальное количество часов работы $maxTime_L$ линии L в сутки.

В соответствии с принятой в теории расписаний системой обозначений, включающей три поля, поставленная задача может быть охарактеризована как $Qm / sum - job, b < n, s_{IJ}^L / Time_{Lmax}, s_{IJ}^L \min, C_j \leq (d_j + t_z)$. Первое поле характеризует обслуживающую систему, второе поле – партии и переналадки между партиями, третье

поле – критерий задачи. Здесь использованы следующие обозначения: Q – параллельные производственные линии разной производительности (малых и больших диаметров); m – количество приборов, т. е. производственных линий, $m = 2$; $sum - job$ – последовательное обслуживание требований с индивидуальным завершением обслуживания; $b < n$ – каждая партия ПИ-трубы с одним значением диаметра D_f может включать не более чем b позиций, причем b не может превышать некоторое значение n , которое можно изготовить за установленное максимальное количество часов работы $maxTime_L$ L -ой линии в сутки; s_{IJ}^L – длительность и количество переналадок определяется типом линии и последовательностью групп позиций ПИ-трубы; $Time_{Lmax}$ – максимальная загрузка каждой производственной линии; $s_{IJ}^L \min$ – минимум числа переналадок; $C_j \leq (d_j + t_z)$ – момент завершения изготовления C_j (соответствующий $prodDate_j$) каждой позиции ПИ-трубы не должен превышать значение времени, определяемое суммой директивного срока d_j и заданного количества дней t_z , на которое откладывается производство неуккомплектованной позиции ПИ-трубы.

Партии ПИ-трубы должны изготавливаться на каждой линии в порядке эвристического правила очередности EDD (Earliest Due Date) неубывания директивных сроков d_j с учетом t_z [3, 4].

Общеизвестная задача построения допустимого относительно директивных сроков расписания изготовления ПИ-трубы состоит в отыскании разбиения каждой группы на некоторое число партий и распределении этих партий по приборам (линиям малых и больших диаметров) [3].

В соответствии с пятым и шестым ограничениями на последовательность изготовления заказанных позиций партия ПИ-трубы с одинаковым диаметром D_f может быть разбита на несколько целых партий и одну неполную партию. Для решения поставленной задачи было применено правило Макнотона (wrap around rule или «правило обертки») [3, 5, 6], которое заключается в том, что вначале первым прибором в интервале времени $[0, t]$ обслуживается максимальное количество целых партий и неполная партия. Остаток неполной партии, который не был обслужен в интервале $[0, t]$, об-

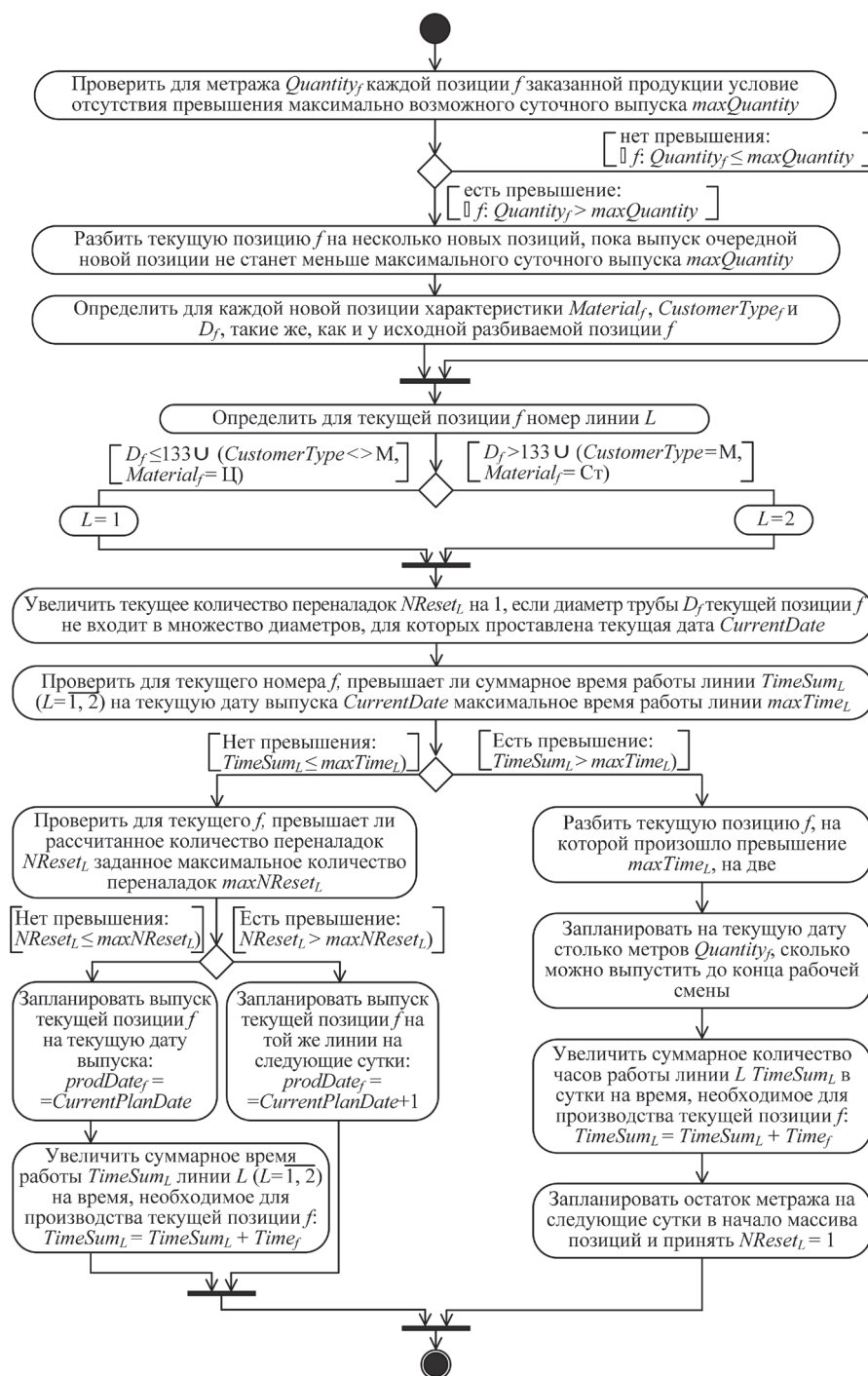


Рис. 1. Диаграмма деятельности алгоритма решения многокритериальной задачи составления расписания производства ПИ-трубы и фасонных изделий

служивается на втором приборе, далее обслуживается последующее максимальное количество целых партий и неполная партия, остаток которой первым обслуживается на третьем приборе и так далее. Момент времени $[0, t]$ здесь представляет собой интервал $[0, maxTime_L]$. И остаток неполной партии, который не удастся изготовить за установленное максимальное количество часов работы $maxTime_L$ L -ой линии

в сутки, переносится на следующие сутки и обслуживается первым из всех позиций ПИ-трубы с одинаковым диаметром D_f .

Разработанный алгоритм, составляемый на основе плана продаж и производства, отсортированного по возрастанию даты отгрузки $ShipmentDate_f$ с учетом укомплектованности исходными материалами, представлен на рис. 1 диаграммой деятельности.

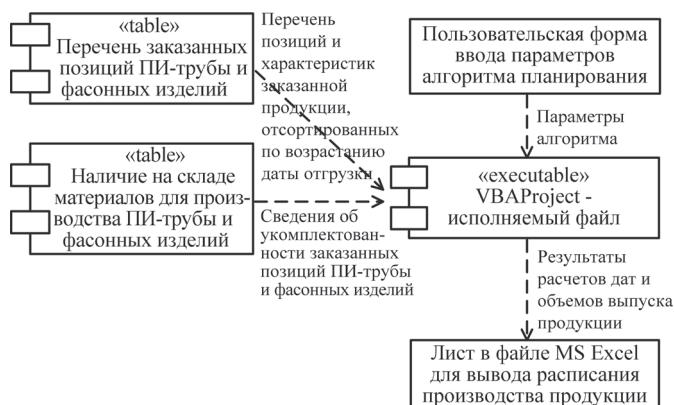


Рис. 2. Структура программного обеспечения для реализации алгоритма

План выпуска ПИ-трубы

Количество часов работы линии 1 (малых диаметров) (в сутки): 20

Количество переналадок линии 1 (малых диаметров) (в сутки): 3

Количество часов работы линии 2 (в сутки): 20

Количество переналадок линии 2 (в сутки): 3

Неукомплектованные позиции перемещать на: 3 дн.

Максимальная суммарная длина изготавливаемых труб (в сутки): 1500 метров

☒ Работа по субботам ☐ Работа по воскресеньям

Спланировать выпуск труб

Рис. 3. Пользовательская форма для ввода параметров алгоритма

План производства ПИ-трубы с 01.06.2017 по 15.06.2017					Составлен 31.05.2017 15:49:00						
№ п/п	Наименование продукции	Df	Ед. изм.	Кол-во	Тип заказа	№ за-каза	Комплек-тация	Дата выпуска	Дата отгрузки	№ ли-нии	Итог м
1	Труба Ц 48х3,5-1-ППУ-ПЭ/125 # Труба ГОСТ 3262 /Ст 20	48	м.п.	230	М	1862-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	2	230
2	Труба Ц 48х3,5-1-ППУ-ПЭ/125 # Труба ГОСТ 3262 /Ст 20	48	м.п.	320	РБ	1901-ПИ	полная	01.06.17	03.06.17	1	320
3	Труба Ст 57х3-1-ППУ-ПЭ/125 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	57	м.п.	120	РФ	1873-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	1	100
4	Труба Ст 57х3,5-32х3-1-ППУ-ОЦ/200 # Труба ГОСТ 10705	57	м.п.	220	М	1896-ПИ	полная	01.06.17	04.06.17	2	220
5	Труба Ст 76х4-1-ППУ-ПЭ/140 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	76	м.п.	108	М	1907-ПИ	полная	01.06.17	05.06.17	2	108
6	Труба Ст 76х4-1-ППУ-ПЭ-625 ЗМКв / 140 L=10000 # Труба	76	шт	2	М	1893-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	2	20
7	Труба Ст 76х4-1-ППУ-ПЭ-625 ЗМКт / 140 L=10000 # Труба	76	шт	2	М	1893-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	2	20
8	Труба Ст 76х3-1-ППУ-ПЭ/140 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	76	м.п.	340	РБ	1901-ПИ	полная	01.06.17	03.06.17	1	340
9	Труба Ст 76х3,5-1-ППУ-ПЭ/140 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	76	м.п.	250	РФ	1890-ПИ	полная	01.06.17	03.06.17	1	250
10	Труба Ст 108х4-1-ППУ-ПЭ/180 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	108	м.п.	438	РФ	1898-ПИ	полная	01.06.17	03.06.17	1	438
11	Труба Ст 108х5-1-ППУ-ПЭ/180 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	108	м.п.	220	М	1907-ПИ	полная	01.06.17	05.06.17	2	220
12	Труба Ст 108х4-1-ППУ-ПЭ/180 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	108	м.п.	360	М	1891-ПИ	полная	01.06.17	03.06.17	2	360
13	Труба Ст 133х4-1-ППУ-ПЭ/225 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	133	м.п.	246	М	1862-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	2	246
14	Труба Ст 133х4-1-ППУ-ОЦ/225 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	133	м.п.	280	РФ	1894-ПИ	полная	01.06.17	04.06.17	1	52
15	Труба Ст 133х4-1-ППУ-ПЭ/225 # Труба ГОСТ 10705 /Ст 20	133	м.п.	372	М	1883-ПИ	полная	01.06.17	02.06.17	2	76
ИТОГО за 01.06.2017 Выпуск на линии 1 (малых диаметров)				1500	м	Выпуск на линии 2 (больших диаметров)				1500	м
1	Труба Ст 38х3-1-ППУ-ПЭ/110 # Труба ГОСТ 8732 /Ст 20	38	м.п.	30	М	1908-ПИ	нет труб	02.06.17	04.06.17	2	30
2	Труба Ц 42,3х3,2-1-ППУ-ОЦ/125 # Труба ГОСТ 3262 /Ст 20	42	м.п.	150	РФ	1866-ПИ	полная	02.06.17	04.06.17	1	150
3	Труба Ст 76х3,5-1-ППУ-ПЭ/140 # Труба ГОСТ 8732 /Ст 20	76	м.п.	250	РФ	1892-ПИ	полная	02.06.17	04.06.17	1	250

Рис. 4. Фрагмент расписания

Разработанный алгоритм реализован средствами Microsoft Excel и редактора VBA. Структура программного обеспечения для реализации разработанного алгоритма представлена на рис. 2. На рис. 3 представлен вид пользовательской формы для выбора параметров алгоритма. Фрагмент сформированного расписания приведен на рис. 4.

Результат работы алгоритма – расписание, допустимое или оптимальное.

Для решаемой задачи допустимым расписанием будет такое, при котором все позиции ПИ-трубы будут изготовлены в директивные сроки d_j , к которым необходимо или желательно отгрузить заказы, с учетом заданного количества дней t_z , на которое откладывается про-

изводство неукомплектованной позиции ПИ-трубы [3, 4, 7, 8]. В общем случае такое расписание может и не существовать.

Оптимальное расписание – это расписание с наименьшим значением количества переналадок и наибольшей загрузкой производственных линий (среди всех рассчитанных допустимых расписаний) [3, 4, 7, 8].

Чтобы определить, является ли найденное расписание оптимальным, необходимо составить несколько расписаний с различными значениями количества переналадок (которое вводится на пользовательской форме, представленной на рис. 3), а затем выбрать расписание, наилучшим образом удовлетворяющее критериям задачи.

Заклучение

Таким образом, был разработан алгоритм решения задачи составления расписания, учитывающий многокритериальный характер задачи, производственные и технологические особенности конкретного предприятия, с возможностью дальнейшей интеграции в создаваемую

в настоящее время MES-систему управления производством в ООО «СМИТ-Ярцево». Внедрение программного обеспечения, реализующего данный алгоритм, позволило повысить эффективность использования оборудования и существенно снизить издержки предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Захарченко, К. В.** Планирование материальных потребностей склада в ООО «СМИТ-Ярцево» / К. В. Захарченко, Т. В. Мрочек // Энергетика, информатика, инновации – 2017 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сб. трудов VII-ой межд. науч. техн. конф.: в 3 т. – Т. 1. – 2017. – 390 с. – С. 268–271.
2. **Лазарев, А. А.** Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А. А. Лазарев, Е. Р. Гафаров. – М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2011. – 222 с.
3. **Ковалев, М. Я.** Календарное планирование. Курс лекций / М. Я. Ковалев [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bsu.by/Cache/pdf/177553.pdf>. – Дата доступа: 01.02.2018.
4. **Танаев, В. С.** Теория расписаний. Групповые технологии / В. С. Танаев, М. Я. Ковалёв, Я. М. Шафранский. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1998. – 290 с.
5. **Butterworth, R.** Machine scheduling [Electronic resource] / R. Butterworth // Department of Combinatorics and Optimization of University of Waterloo. – 1979. – Mode of access: <http://rbutterworth.nfshost.com/Scheduling/1.7-parallel>. – Date of access: 01.04.2018.
6. **McNaughton, R.** Scheduling with deadlines and loss functions [Electronic resource] // Management Science (pre-1986); ABI INFORM Global. – 1959. – Vol. 6, № 1. – P. 1–12. – Mode of access: <http://www.columbia.edu/~cs2035/courses/ieor8100.F16/mcn1.pdf>. – Date of access: 01.04.2018.
7. **Сотсков, Ю. Н.** Математические модели и методы календарного планирования: учеб. пособие / Ю. Н. Сотсков, В. А. Струевич, В. С. Танаев. – Минск: Университетское, 1994. – 232 с.
8. **Танаев, В. С.** Теория расписаний. Одностадийные системы / В. С. Танаев, В. С. Гордон, Я. М. Шафранский. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 384 с.

REFERENCES

1. **Zakharchenkov, K. V.** Planirovanie material'nykh potrebnostej sklada v ООО «SMIT-Jartsevo» [Planning of material needs of a warehouse in Smith-Yartsevo, Ltd] / K. V. Zakharchenkov, T. V. Mrochek // Jenergetika, informatika, innovacii – 2017 (jelektrojenergetika, jelektrotehnika i teplojenergetika, matematicheskoe modelirovanie i informacionnye tehnologii v proizvodstve) [Power, informatics, innovation – 2017 (power engineering, electrical and heat power engineering, mathematical modeling and information technologies in production): proceedings of the VII international scientific and technical conference]: in 3 Vol. – Vol. 1. – 2017. – 390 p. – P. 268–271.
2. **Lazarev, A. A.** Scheduling theory. Problems and algorithms / A. A. Lazarev, E. R. Gafarov. – Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2011. – 222 p.
3. **Kovalev, M. Ya.** Scheduling. Course of lectures / M. Ya. Kovalev [An electronic resource]. – Mode of access: <https://www.bsu.by/Cache/pdf/177553.pdf>. – Date of access: 01.04.2018.
4. **Tanaev, V. S.** Theory of schedules. Group technology / V. S. Tanaev, M. Ya. Kovalev, Ya. M. Shafransky. – Minsk: Institute of technical Cybernetics of NAS of Belarus, 1998. – 290 p.
5. **Butterworth, R.** Machine scheduling [Electronic resource] / R. Butterworth // Department of Combinatorics and Optimization of University of Waterloo. – 1979. – Mode of access: <http://rbutterworth.nfshost.com/Scheduling/1.7-parallel>. – Date of access: 01.04.2018.
6. **McNaughton, R.** Scheduling with deadlines and loss functions [Electronic resource] // Management Science (pre-1986); ABI INFORM Global. – 1959. – Vol. 6, № 1. – P. 1–12. – Mode of access: <http://www.columbia.edu/~cs2035/courses/ieor8100.F16/mcn1.pdf>. – Date of access: 01.04.2018.
7. **Sotskov, Yu. N.** Mathematical models and methods of scheduling: textbook / Yu. N. Sotskov, V. A. Strusevich, V. S. Tanaev. – Minsk: Universitetskoe, 1994. – 232 p.
8. **Tanaev, V. S.** Theory of schedules. Single-stage systems / V. S. Tanaev, V. S. Gordon, Ya. M. Shafransky. – Moscow: Science. Main edition of physical and mathematical literature, 1984. – 384 p.

Поступила
19.04.2018

После доработки
25.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

K. V. Zakharchenkov, Zh. A. Mrochek, T. V. Mrochek

ALGORITHM FOR SOLUTION OF MULTICRITERION PROBLEM OF PRODUCTION PLANNING OF PIPES AND SHAPED PRODUCTS

One of the modern directions of increase in economic efficiency of the enterprise is a production planning automation, including the automated scheduling of production. Introduction of ready program solutions for automated preparation of production schedules (APS, MES-systems) at enterprises is constrained by the complexity and high cost of adapting to the specific conditions of the enterprise, implementation and maintenance. The complexity of the problem is determined by a large number of product names, rapid changes in the operational environment and the need for clear interaction with the warehouse. The task is multicriterion as it is necessary to provide the maximum loading of each production line with a minimum of readjustments, and at the same time the schedule must comply with the terms of shipment of products, taking into account the availability of raw materials for production. Therefore, the authors have developed an algorithm and software that allow for an acceptable time to make an admissible, often optimal schedule for the production of preinsulated pipes and shaped products in SMITH-Yartsevo, Ltd (Russia). In this case, each group of products is divided into batches in accordance with the McNaughton rule (wrap around rule), and the resulting batches are distributed along the production lines. For the choice of the optimal schedule it is necessary to make several schedules with different values of the number of readjustments and select the one that best meets the criteria of the task.

Keywords: production planning, algorithm, McNaughton rule, readjustment, production line, admissible schedule, optimal schedule



Захарченков К. В. Доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета (г. Могилев). Защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Управление в социальных и экономических системах» (2014). E-mail: zaharchenkovkv@mail.ru.

Zakharchenkov K. V. Associate professor of the Department «Automated control systems» of the Belarusian-Russian University (Mogilev). He defended his PhD thesis on the speciality «Management in social and economic systems» (2014).



Мрочек Ж. А. Доктор технических наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», Белорусский национальный технический университет. Член-корреспондент Международной Академии наук Евразии, академик Белорусской инженерной технологической академии и Белорусской инженерной академии. E-mail: Mrochek.j@bntu.by.

Mrochek Zh. A. Doctor of Engineering, Professor, Department of engineering technology, Belarusian National Technical University. Corresponding member of the international Academy of Sciences of Eurasia, academician of the Belarusian engineering technology Academy and the Belarusian engineering Academy.



Мрочек Т. В. Доцент кафедры «Автоматизированные системы управления» Белорусско-Российского университета (г. Могилев). E-mail: mrovlad@mail.ru.

Mrochek T. V. Associate professor of the Department «Automated control systems» of the Belarusian-Russian University (Mogilev).

V. Y. STEPANOV, E. A. HVITKO

ALGORITHM FOR ALERTING THE UNMANNED AERIAL VEHICLE OPERATOR BASED ON THE IMAGE POTENTIAL OBSTACLE BORDERS DETECTION ON THE FLIGHT TRAJECTORY USING THE OPEN CV LIBRARY

Belarusian National Technical University

The article describes several modifications of the obstacle detection algorithm on the flight trajectory of an unmanned aerial vehicle (UAV). First, we give an illustration of the problems on the example of the relief image on topographic maps and the essence of the relief image by horizontal contours. Then the conclusion is made about necessity of development of algorithm and software, which can help the operator of the UAV in deciding on necessary trajectory changes of UAV, since, for example, guided solely by the method image of the terrain or another similar method in the planning of the UAV trajectory as preliminary preparation for the flight, however, such methods are fairly static and are not suitable in such situations as, for example, detection of unexpected obstacles. Further, the article describes the process of developing several modifications of the algorithm that solves the above problem and generates a notification of the UAV operator. It is also described depending on the flight speed of the UAV and natural conditions; it is possible to choose the most appropriate modification of the algorithm, which has different sensitivity to potential obstacles. The conclusion shows the settings screen and results of the software work and the principle of visual notification of the UAV operator with the proposal direction of the flight around detected obstacles.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, mathematical modeling, software, algorithm for finding obstacles on the flight trajectory, notification of the UAV operator.*

Introduction

In today's world, received fairly widespread the unmanned aerial vehicles (UAV), which have a variety of purposes and often require using in conditions far from ideal. Thus, the problem of detecting obstacles on the flight trajectory, especially those that have arisen unexpectedly, since the design of UAV if bump with almost any kind of obstacle do not allow it to remain fully operational.

Therefore, it is necessary to design and implement an algorithm for detection potential obstacles to the flight of the UAV, to develop software that uses streaming image acquisition from the camera.

The main part

To illustrate the problem, consider, for example, the image of relief on topographic maps, which gives a complete and sufficiently detailed idea of the irregularities of the earth's surface, their shape and relative position, heights of the

terrain points, the prevailing steepness and length of the slopes. Let's consider the essence of the relief image by horizontal contours (figure 1).

Horizontal contour is a closed line representing a contour of irregularities on the map, all points of which are located on the ground at the same height above sea level. Contours can be represented as lines obtained as a result of the cross-section of the terrain by level surfaces, that is, surfaces parallel to the water level in the oceans [1].

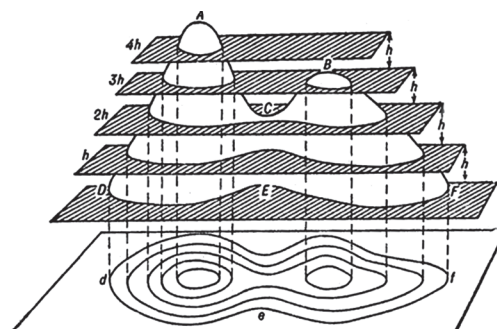


Figure 1. Image of relief by horizontal contours on topographic maps

However, such images are quite static and are not suitable in such situations as, for example, the detection of an unexpectedly appeared obstacle, and as mentioned earlier, in the case of an unmanned aerial vehicle, a bump with even small objects will almost certainly have catastrophic consequences for UAV. For this reason in this article the most attention will be paid to the detection of dynamically appearing obstacles due to potential obstacle borders detection on the image and reaction of system after this.

Hence, the algorithm, step by step:

- 1) sensors reading (modeling);
- 2) get image from camera (in article using Open CV);
- 3) assignment of safe (green), potentially dangerous (yellow) and dangerous (red) zones on the image for the purpose of detection of potentially dangerous objects and filtration of borders of the objects which are not dangerous (being aside from a trajectory of flight – in a green zone);
- 4) convert the obtained image into a grayscale (shades of gray);
- 5) detection potential obstacles on the image;
- 6) alerting the UAV operator (displaying of a message and playback of an audio signal) about the potential obstacle detection (subject to fulfilment of previous step), indicating the most secure direction of the overflight of the obstacle (left or right and up or down) based on the detection of the area obstacle and its location relative to the UAV trajectory [2–5].

For greater clarity, we present the most significant steps of the described algorithm in the form of flowchart. Hence, step 2 of the algorithm (get information from the camera of an unmanned aerial vehicle) is shown on figure 2.

As the device receiving the video stream, simulating the UAV camera, were used Logitech camera C110, with the following main characteristics:

- number of megapixels: 0.3;
- resolution (photo): 640×480;
- resolution (video): 640×480;
- interpolated resolution (video): 1024×768;
- interpolated resolution in megapixels (photo): 1.3 Mpix;
- maximum frequency: 30 Hz.

Then, to research the different variants of sensitivity to the borders of the image objects, consider two variants of borders detection in images (steps from the 3rd to the 5th of algorithm), prog-

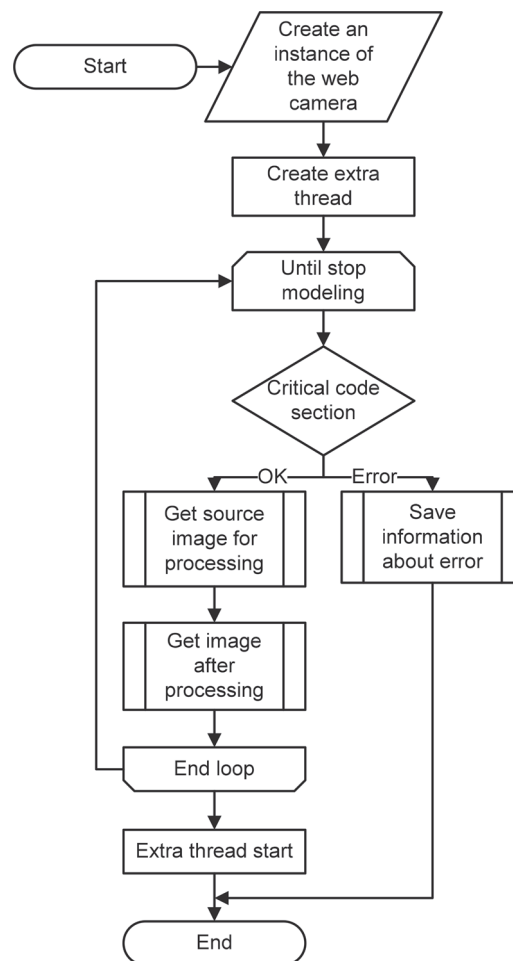


Figure 2. Receiving video stream from Web-camera with image conversion using Open CV

rammed in the unsafe context of the C# programming language, to accelerate the image processing.

1) method of the image binarization by threshold (figure 3, where illustrate the preparation procedures for analyzing the original image and figure 6, where illustrate the obstacle detection procedure) as the most sensitive to detection the obstacles of those considered, therefore it can be used only in conditions close to ideal [6–8].

Note: since memory is a linear structure, the entire image will be represented in computer memory not like a matrix, and not like we imagine the image in a life (each pixel consists of three colors: red, green and blue), but the entire image will be represented as a linear structure, where each pixel is represented as three values (without transparency – an additional alpha channel) – figure 4.

It should also be noted that the step 4 is obtained by applying the known color ratio coefficients of the RGB model of the main image) and

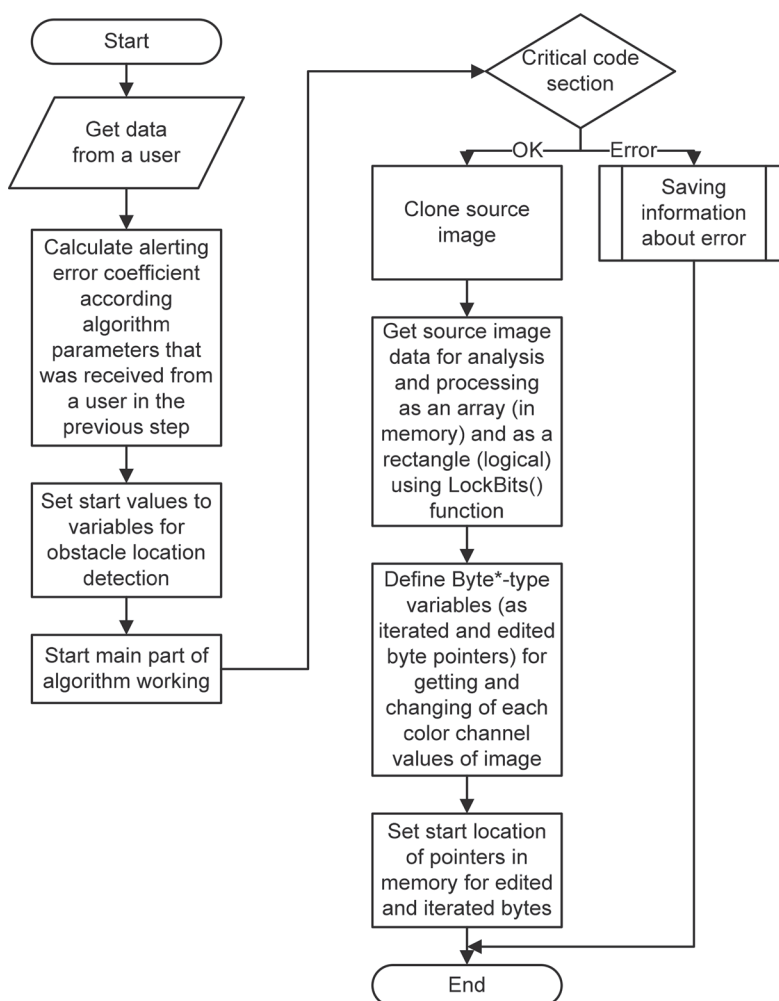


Figure 3. – Image preparation for analysis

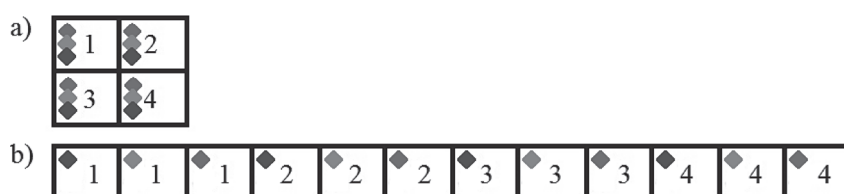


Figure 4. Representation of images: a) logical; b) physical

at the physical level is part of the step 5 of the algorithm.

The 3rd step is the division of the image into logical sectors-zones (the size of the sectors selected empirically and, for example, the red zone is equal to the fourth part of the image, because this size is sufficient for the flight of the UAV between the objects placed in the yellow zone on the left and right or up and down, if the analysis is conducted from a distance of approximately $5 \times b$, where: b – the width of the UAV, with the characteristics of the camera similar to those presented earlier) [9-15].

This algorithm step most fully reflects the essence of the development of our algorithm as a whole, which consists in separating the processing logic of potentially dangerous zones based on calculating the areas of obstacles in these zones with automated camera calibration and taking into account the flight speed of the UAV, without the need for additional measurement equipment.

The process of camera calibration and zones visual representation is shown on figure 5.

A breakdown into zones flowchart is presented below (figure 6):

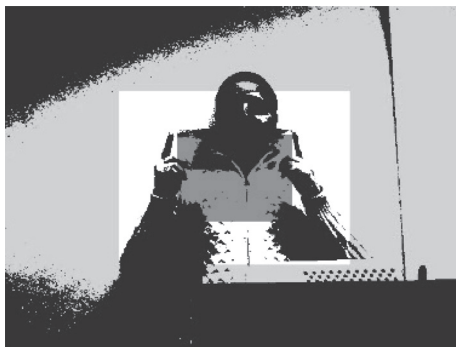


Figure 5. The process of camera calibration and zones visual representation

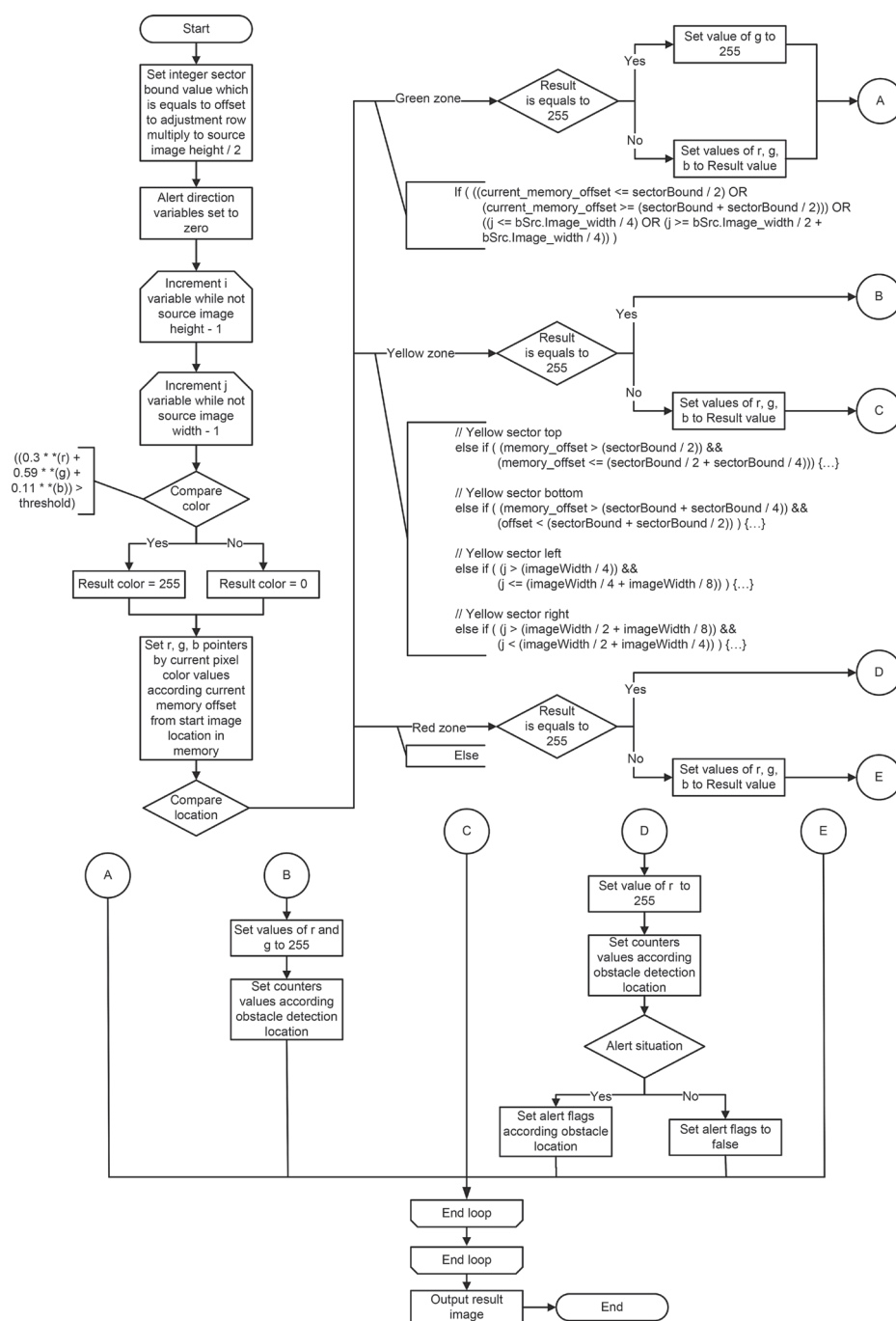


Figure 6. A breakdown into zones flowchart

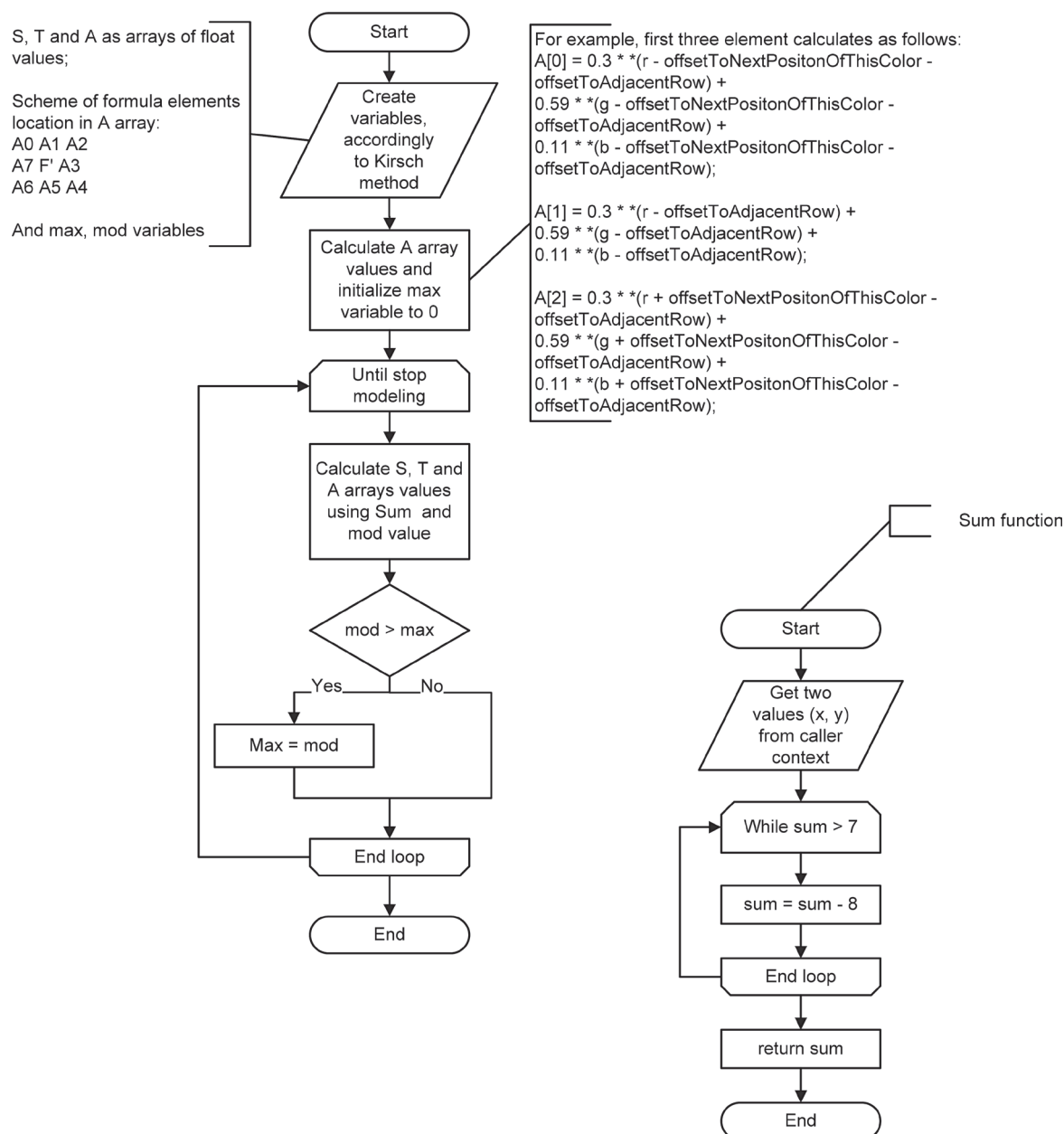


Figure 7. The key features of Kirsch method in comparison with the method of binarization by threshold

2) the Kirsch method. To prevent of duplication elements in flowcharts, will be presented only the key features, in comparison with the method of binarization by threshold value [15]. The Kirsch method has an average level of sensitivity to obstacles. Algorithm fragments are shown on figures 7.

The last step of the algorithm is to alert (using developed software) the operator of the UAV which controls the flight about potentially dangerous situation and possible bump (if an obstacle was detected) with the displaying of an alert message and playback of an audio signal to attract the attention of the operator.

The operator is also informing about the most secure direction of the overflight of the obstacle, according to the area of the obstacle in the yellow and red zones (right (left) or up (down)).

The developed software has two tabs: «Settings» and «Simulation», three control buttons «Start» – to run the simulation based on the settings, «Stop» – to stop the modeling process and «Save log» – to generate a report involves the setting values and other working events of software to a text file [16–18].

The «Settings» tab is shown on figure 8:

According the figure above the «Settings» tab involves the next settings:

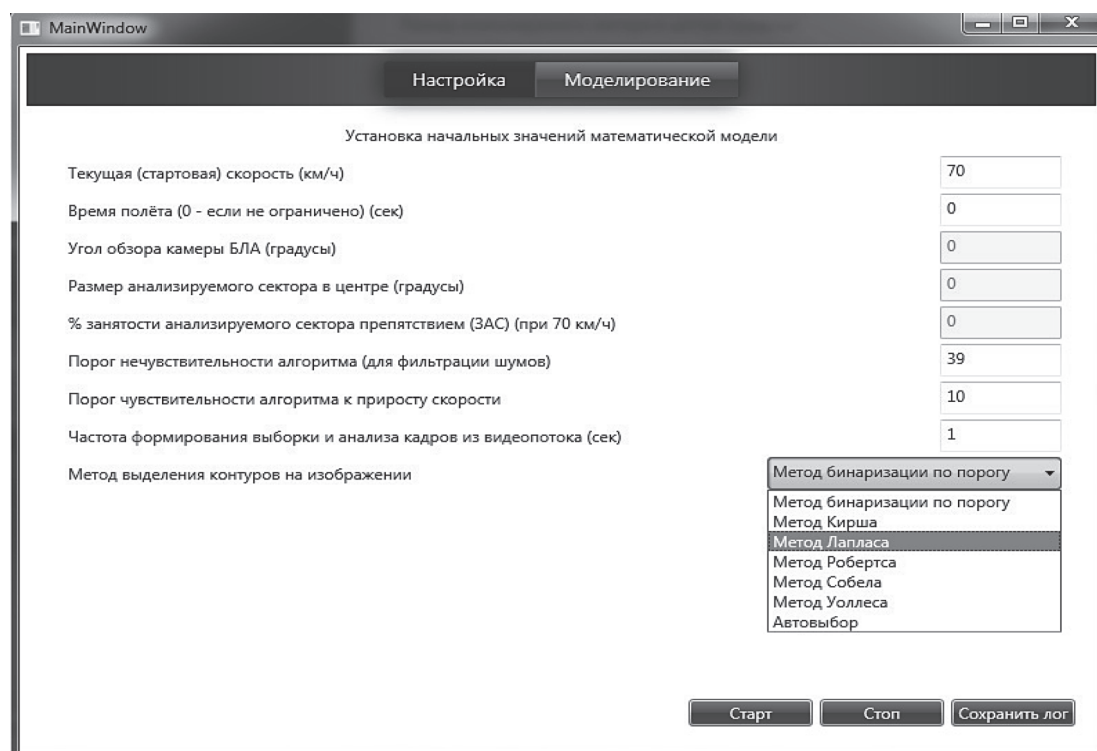


Figure 8. «Settings» tab

- the flight speed of an unmanned aerial vehicle – this parameter determines the power of noise filtering during searching for obstacles;

- flight time can be limited if necessary, but by default – simulation continues until stopped;

- next three parameters – set to zero – are not used in this version of the software;

- threshold of insensitivity – the coefficient that determines what the total area occupied by a potential obstacle (obstacles) is considered noise;

- threshold of sensitivity to the increase of speed – the greater the speed, the more algorithm sensitivity to obstacles, because with speed increasing the maneuvering should do as soon as possible;

- data sampling rate – algorithm trigger frequency in seconds;

- method for detecting borders on the image – a drop-down list that allows you to select the desired method with different sensitivity, because the choice of method should vary depending on the experiment conditions. Possible options: Binarization by threshold, Kirsch method, Laplace method, Roberts method, Sobel method, Wallace method and auto selection.

Tab «Simulation» is divided into four logical zones:

- top left – display streaming video from the camera (original image, before the analysis);

- top right – display the result of the analysis with a visual representation of zones described in the third step of the algorithm;

- alerting zone (for display alert message during detection of a potential obstacle);

- part of the software log (for display exceptions of the hardware component working or failures in the software itself).

Alert situation where was obstacle detected is shown on figure 9:

Flight in a normal mode is shown on figure 10:

Figure 9 shows a result of execution the algorithm, where the borders of the potential obstacles detect by using of Laplace method. All options are shown in figure 8 (drop-down list with choosing of method for detecting borders on the image) As shown on the figure, if the UAV was directed to an object that potentially threatens it with a bump, the operator receives a visual alert (together with an audio signal) with indicating the direction in which it is proposal to direct the UAV.

Figure 10 shows the situation of simulation the flight of UAV in non-ideal conditions (in conditions of high clouds of the autumn sky) in order to determine the number of false alerts and establish the algorithm's insensitivity factor.

It should be noted the most important stage of the software execution is using of an obstacle de-

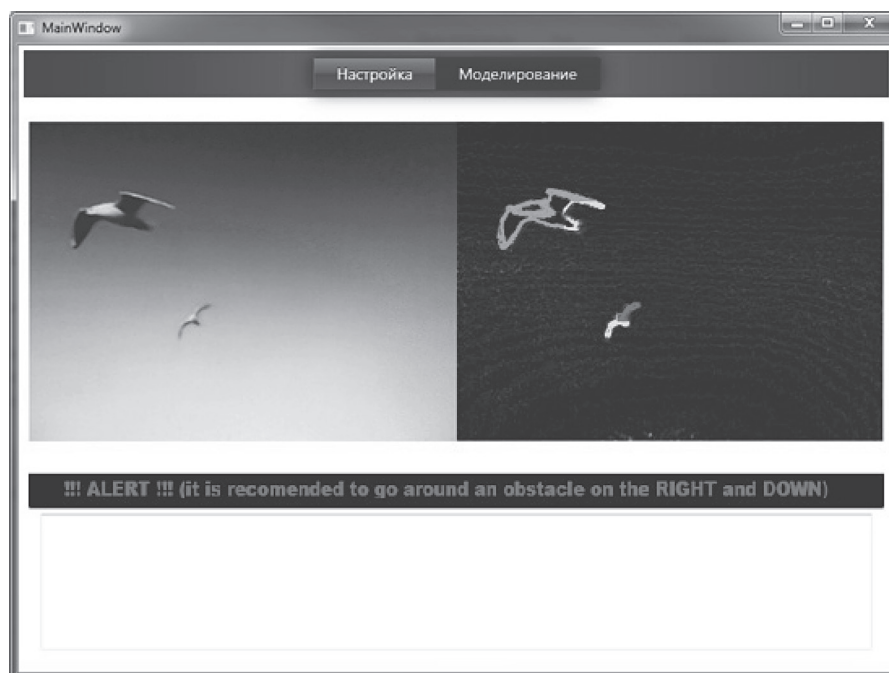


Figure 9. Alert situation where was obstacle detected

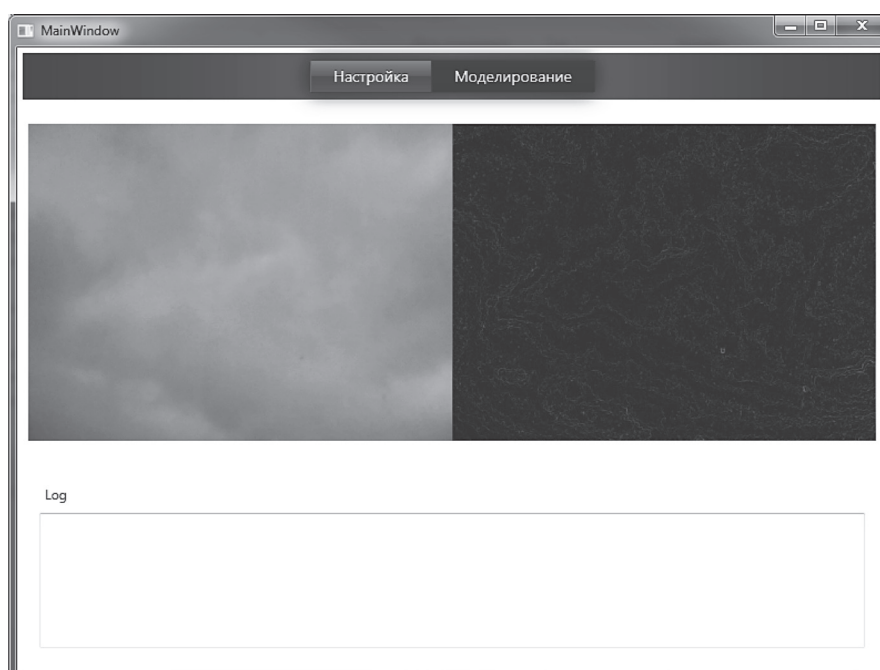


Figure 10. Flight in a normal mode

tection algorithm based on the programmed processing logic of the zones potentially dangerous for flight (for convenience, they are highlighted in color and are called respectively), and the operator notification subsystem is easily replaceable and is intended to demonstrate the algorithm execution. In the future, due to the low cohesion and modularity of the developed solutions, the operator alert subsystem can be easily replaced with

the sending control impacts subsystem to the UAV.

Conclusion

In this paper, the image of relief on topographic maps was raised. Then the conclusion was made about the need to detect and respond to objects around UAV, the presence of which, nothing was known in advance.

The algorithm for detection of potential obstacles to the flight of UAV was designed and implemented. Next, software that get video stream from the camera using the Open CV library, that used above mentioned algorithm in several modifications, and provides visual and audio alert for the user (UAV operator) about need to reaction to the potential dangerous situation. Also, software can propose of a possible direction of flight

around the obstacle, where, according to the software, less chance of a bumping with a potential obstacle.

As a further development of this theme, it can be proposed to take into account the distance to the potential obstacle according the flight speed of the UAV, to be able to estimate the time range available to the operator for decision-making about control of the UAV.

REFERENCES

1. **lektsii.org** [Electronic resource]. – Access mode: <https://lektsii.org/4-12821.html>. – Date of access: 10.09.2018.
2. **Recog.ru** – Распознавание образов для программистов [Electronic resource]. – Access mode: <http://blog.vidikon.com/?p=228>. – Date of access: 15.10.2018.
3. **RoboCraft** [Electronic resource]. – Access mode: <http://robocraft.ru/blog/computervision/264.html>. – Date of access: 17.10.2018.
4. **Habr** [Electronic resource]. – Access mode: <https://habrhabr.ru/post/208090/>. – Date of access: 18.10.2018
5. **Методы** компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – Москва: Физматлит, 2003. – 784 с.
6. **OpenCV** – библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом [Electronic resource]. – Access mode: <http://locv.ru>. – Date of access: 18.10.2018
7. **Старовойтов В. В., Голуб Ю. И.** Цифровые изображения: от получения до обработки – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – 202 с.
8. **Приоров, А. Л.** Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / А. Л. Приоров, И. В. Апальков, В. В. Хрящев. – Ярославль: ЯрГУ, 2007. – 235 с.
9. **Фисенко, В. Т.** Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
10. **Шапиро, Л.** Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман: пер. с англ. – Москва: БИНОМ. 2006. – 752 с.
11. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва: Техносфера, 2012. – 1104 с.
12. **Методы** компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
13. **Цифровая** обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие // И. С. Грузман [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
14. **Прэтт, У.** Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.
15. **Стариченко, Б. Е.** Теоретические основы информатики : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
16. **Шилдт Г.** C# 4.0: полное руководство.: Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 1056 с.: ил. – Парал. тит. англ.
17. **Троелсен Э.** Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5, 6-е изд.: Пер. с англ. – М.: ООО «И. Д. Вильямс», 2013. – 1312 с.: ил. – Парал. тит. англ.
18. **Натан А.** WPF 4. Подробное руководство. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 880 с., ил.

Поступила
19.07.2018

После доработки
15.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

Степанов В. Ю., Хвилько Е. А.

АЛГОРИТМ ОПОВЕЩЕНИЯ ОПЕРАТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ГРАНИЦ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ ПОЛЁТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ OPEN CV

Белорусский национальный технический университет

В статье даётся описание нескольких вариантов алгоритма обнаружения препятствий на траектории движения беспилотного летательного аппарата (БЛА). Вначале даётся иллюстрация проблематики на примере изображения рельефа на топографических картах и сущность изображения рельефа горизонталями. Затем делается вывод о необходимости разработки алгоритма и программного обеспечения, которые могут помочь оператору БЛА в принятии решения о необходимости изменения траектории БЛА, т.к., например, руководствуясь исключительно

методом изображения рельефа горизонталями или другим подобным методом при планировании траектории БЛА можно в качестве предварительной подготовки к полёту, однако такие методы являются достаточно статичными и не подходят в таких ситуациях, как, например, распознавание неожиданно появившегося препятствия. Далее в статье описан процесс разработки нескольких модификаций алгоритма, решающего поставленную выше задачу и производящего оповещение оператора БЛА. Также описано, что в зависимости от скорости полёта БЛА и условий его эксплуатации, есть возможность выбора наиболее подходящей модификации алгоритма, имеющую разную чувствительность к потенциальным препятствиям. В заключение приводятся настройки программы оповещения и результаты работы, где показан принцип визуального оповещения оператора БЛА с указанием рекомендуемого направления облёта беспилотным летательным аппаратом зафиксированного препятствия.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, математическое моделирование, программное обеспечение, алгоритм обнаружения препятствий на траектории полёта, оповещение оператора БЛА.



Stepanov V. Y. Received the Software Engineer and M.S.C. degree in field of «Information systems and technologies» from the Belorussian National Technical University in 2013 and 2014 respectively. He is currently working toward in PhD degree in the field of «Digital signal processing and control» including, parametric optimization and programming. His research interests include IT, programming and robust control.

E-mail: vladimir.stepanov@bntu.by



Hvitko E. A. Master Student of the department «Information Systems and Technologies» of the International Institute of Distance Education BNTU. Lecturer of the Department «Software Computing and Automated Systems» of the faculty of «Information Technologies and Robotics». His current research interests include control of unmanned aerial objects.

E-mail: evgeni.hvitko@bntu.by

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

УДК 656.13.08

А. Н. КЛИМОВИЧ, В. Н. ШУТЬ

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ V2I ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Брестский государственный технический университет

Задача эффективной организации дорожного движения с каждым годом становится все актуальнее. Постоянный рост числа автомобилей и объема перевозок требует совершенствования методов и алгоритмов управления движением. Такое совершенствование становится возможным за счет повсеместного распространения глобальных систем навигации и позиционирования, развития технологий связи и мобильного интернета, появления специализированных технологий взаимодействия между автомобилями и дорожной инфраструктурой (V2I), повышения качества моделей машинного обучения, компьютерного зрения, появления автономных автомобилей. В работе рассматривается подход к управлению движением на перекрестке, основанный на использовании V2I взаимодействия, приводится общая схема такого подхода и отличие от обычного светофорного регулирования. Описывается алгоритм организации движения, использующий преимущества V2I взаимодействия для повышения пропускной способности перекрестка, а также проводится анализ эффективности данного алгоритма по сравнению с классическим светофорным регулированием и более совершенными адаптивными системами управления. Повышение пропускной способности достигается за счет динамического формирования тактов перекрестка на основе более полной информации о транспортном потоке. Для сравнения различных методов регулирования используется авторская среда имитационного моделирования с применением мультиагентного подхода.

Введение

Современные коммуникационные технологии, позволяющие осуществлять передачу данных между автомобилями – V2V (Vehicle-to-Vehicle), либо между автомобилями и дорожной инфраструктурой – V2I (Vehicle-to-Infrastructure), базируются на стандартах беспроводной связи DSRC (Dedicated short-range communications), WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) IEEE 802.11p [1]. Одно из очевидных применений этих технологий заключается в совершенствовании алгоритмов управления движением для повышения пропускной способности транспортных сетей. Общий принцип организации движения на перекрестке с использованием V2I-взаимодействия заключается в установке на перекрестке специального устройства-передатчика (RSU – road side unit), соединенного через проводную сеть с сервером или местным центром управления дорожным движением (рис. 1). Передатчик имеет определенный радиус действия, находясь в котором, автомобили имеют возможность осуществлять с ним обмен данными, сообщая свое положение, скорость и маршрут движе-

ния. На основе собранной информации, в соответствии с алгоритмом управления, система генерирует команды как для групп, так и для отдельных автомобилей, контролирующие порядок прохождения перекрестка, эффективное и безопасное использование его пропускной способности. Повышение эффективности управ-

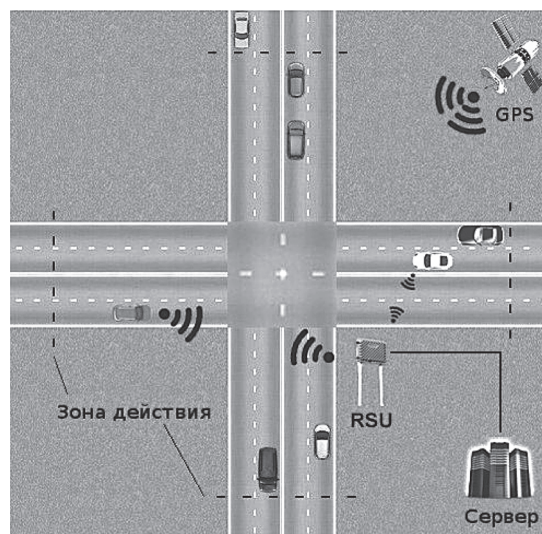


Рис. 1. Схема управления перекрестком с использованием V2I взаимодействия

ления достигается за счет принятия решений на основе более детальной информации о транспортных потоках и возможности более гибкого управления через передачу сообщений. Несмотря на имеющиеся варианты организации движения по описанной схеме [2, 3, 4], пока не существует какой-либо реализации, претендующей на повсеместное внедрение в качестве замены классическому светофорному регулированию.

Предлагаемый алгоритм управления перекрестком

При классическом светофорном регулировании управление перекрестком осуществляется путем последовательной смены тактов управления. Каждый такт обладает определенной длительностью и задает разрешенные для движения направления. При этом такты меняются циклически, чтобы обеспечить возможность проезда в каждом направлении. Это приводит к растрате пропускной способности для направлений с низкой интенсивностью движения. Также статически заданные такты не всегда оптимально подходят для текущего состояния транспортных потоков.

Использование V2I-взаимодействия позволяет динамически формировать разрешенные для движения направления исходя из потребностей и загрузки транспортной сети. Для обеспечения безопасности проезда разрешать движение предлагается только автомобилям, движущимся по непересекающимся траекториям. Выбирать, в каких направлениях разрешать, а в каких запрещать движение, следует исходя из цели минимизировать задержки на перекрестке и повысить его пропускную способность. Однако напрямую оптимизировать эти показатели сложно в связи с большим количеством неопределенностей. Поэтому предлагается осуществлять выбор набора траекторий, разрешенных для движения, исходя из присвоенного им веса, который, в свою очередь, является суммой весов автомобилей, движущихся по этим траекториям. Весовую функцию следует выбирать таким образом, чтобы оптимизация, основанная на присвоенных весах, приводила в итоге к повышению эффективности перекрестка. Формально, пусть $V = \{v_i\}$ – множество автомобилей, находящихся в радиусе действия передатчика, установленного на

перекрестке. Каждый автомобиль описывается набором параметров $v_i = (d_i, t_i, m_i)$, где d_i – расстояние до перекрестка, t_i – время ожидания, а m_i – маршрут движения, задающий дорогу и номер полосы до и после перекрестка. Для работы системы необходимо задать функцию $f(v)$, определяющую вес w отдельного автомобиля, а также матрицу конфликтных маршрутов $C[m_i, m_j]$, в которой элемент равен 1, если траектории автомобилей, движущихся по маршрутам, пересекаются, и 0 – иначе. Задача алгоритма управления перекрестком заключается в формировании последовательности тактов, где каждый такт описывается набором разрешенных направлений движения M и набором автомобилей A , которые должны проехать перекресток за время этого такта. Множество автомобилей выбирается так, чтобы максимизировать их суммарный вес, с учетом ограничения, что эти автомобили не должны двигаться по пересекающимся траекториям:

$$\sum_{v \in A} f(v) @ max \quad (1)$$

$$\forall (i, j) m_i \ni M, m_j \ni M \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0,$$

где

$$M = \{m_i : v_i \ni A\} \quad (2)$$

Для поиска автомобилей, входящих в множество A , выполняется их группировка. Обозначим через $G_r^k(n)$ максимальное по размеру подмножество ближайших к перекрестку автомобилей, находящихся на полосе k дороги r , движущихся по n различным траекториям. Процесс формирования таких групп из автомобилей, относящихся к одной полосе описан в функции *CreateGroups* (Рис. 2).

Для каждой группы $G_r^k(n)$ можно определить вес, как сумму весов принадлежащих ей автомобилей. Назовем две группы конфликтующими, если они относятся к одной полосе одной дороги, или если этим группам принадлежат автомобили, движущиеся по пересекающимся траекториям. Правило определения конфликтности групп описано в функции *AreConflictGroups* (рис. 3).

Построим граф, в котором вершинам соответствуют группы автомобилей $G_r^k(n)$, а ребро между вершинами существует тогда и только тогда, когда группы не конфликтуют. За построение такого графа отвечает функция *CreateGraph*

Алгоритм 1. Формирование групп $G_r^k(n)$ из множества автомобилей V_r^k , движущихся по полосе k дороги r . Через $V_r^k(n)$ обозначены ближайшие к перекрестку n автомобилей из V_r^k .

```

function CreateGroups( $V_r^k$ )
   $R := \{\}$ 
   $S := \{\}$ 
  for  $n \leftarrow |V_r^k|..1$  do
     $M := \{m_i: v_i \in V_r^k(n)\}$ 
    if  $|M| \notin S$  then
       $G_r^k(|M|) := V_r^k(n)$ 
       $R := R \cup \{G_r^k(|M|)\}$ 
       $S := S \cup \{|M|\}$ 
    end if
  end for
  return  $R$ 
end function

```

Рис. 2. Функция группировки автомобилей

Алгоритм 2. Функция определения конфликтности двух групп $G_{r_1}^{k_1}(n_1)$ и $G_{r_2}^{k_2}(n_2)$.

```

function AreConflictGroups( $G_{r_1}^{k_1}(n_1), G_{r_2}^{k_2}(n_2)$ )
  if  $r_1 = r_2$  and  $k_1 = k_2$  then
    return True
  else if  $\exists (v_i, v_j): v_i \in G_{r_1}^{k_1}(n_1), v_j \in G_{r_2}^{k_2}(n_2), C[m_i, m_j] = 1$  then
    return True
  else
    return False
  endif
end function

```

Рис. 3. Функция определения конфликтности групп

(рис. 4). Заметим, что любой полный подграф, или клика, этого графа задает некоторое множество автомобилей, движущихся по непересекающимся траекториям. Тогда клика наибольшего веса и будет определять множество автомобилей A для текущего такта светофора. Поиск клики максимального веса является типовой задачей, для которой известны эффективные алгоритмы [5, 6]. Поэтому в дальнейшем при описании алгоритмов будем ссылаться на функцию *FindMaxWeightClique*, принимающую на вход описание графа и возвращающую множество вершин, принадлежащих клике максимального веса в этом графе.

После нахождения автомобилей, относящихся к первому такту, процесс продолжается

Алгоритм 3. Функция, выполняющая построение графа неконфликтующих групп $G = (U, E, W)$, где U – множество вершин, элементами которого являются группы автомобилей $G_r^k(n)$, E – множество ребер графа, а W – веса вершин. На вход функция принимает множество всех автомобилей V .

```

function CreateGraph( $V$ )
   $U := \{\}$ 
  foreach  $V_r^k \in V$  do
     $U := U \cup \text{CreateGroups}(V_r^k)$ 
  end foreach
   $E := \{(g_i, g_j): g_i \in U, g_j \in U, \text{AreConflictGroups}(g_i, g_j) = \text{False}\}$ 
   $W := \{w_g = \sum_{v_i \ni g} f(v_i): g \in U\}$ 
   $G := (U, E, W)$ 
  return  $G$ 
end function

```

Рис. 4. Построение графа неконфликтующих групп

Алгоритм 4. Формирование набора описаний тактов P на основе множества всех автомобилей V . Описанием отдельного такта перекрестка является подмножество автомобилей A .

```

function CreatePhases( $V$ )
   $P := \{\}$ 
  while  $V \neq \emptyset$  do
     $G := \text{CreateGraph}(V)$ 
     $Q := \text{FindMaxWeightClique}(G)$ 
     $A := \{\}$ 
    foreach  $q \in Q$  do
      foreach  $v \in q$  do
         $A := A \cup \{v\}$ 
      end foreach
    end foreach
     $P := P \cup \{A\}$ 
     $V := V \setminus A$ 
  end while
  return  $P$ 
end function

```

Рис. 5. Функция формирования тактов перекрестка

для оставшихся автомобилей. В результате получается последовательность описаний тактов, и для каждого автомобиля определено, к какому такту он относится. Для этого используется функция *CreatePhases* (рис. 5).

При классическом светофорном регулировании перекрестком существует понятие промежуточного такта [7]. В отличие от основных

Алгоритм 5. Формирование промежуточного такта на основе предыдущего A_1 и следующего A_2 основных тактов. Описанием промежуточного такта считается множество разрешенных для движения направлений M .

function *CreateIntermediatePhase*(A_1, A_2)

$M_1 := \{m_i: v_i \in A_1\}$

$M_2 := \{m_j: v_j \in A_2\}$

$M := \{m_i: m_i \in M_1, \forall m_j \in M_2 \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0\} \cup \{m_j: m_j \in M_2, \forall m_i \in M_1 \Rightarrow C[m_i, m_j] = 0\}$

return M

end function

Рис. 6. Функция формирования промежуточного такта

тактов, которые служат для разрешения движения определенным группам транспортных и пешеходных потоков и запрета движения другим группам, движущимся в конфликтующем направлении, промежуточные обеспечивают окончание проезда перекрестка теми транспортными средствами, которые не смогли своевременно остановиться у стоп-линии, и служат для подготовки перекрестка к передаче права на движение следующей группе потоков. Во время промежуточного такта во всех направлениях включается запрещающий сигнал светофора и новым транспортным средствам запрещается выезжать на перекресток. Обычно, промежуточный такт включается на короткий промежуток времени в несколько секунд. Так как основные такты в нашем алгоритме формируются динамически, может быть полезным и динамическое формирование промежуточных тактов на основе предыдущего и следующего основных тактов. Для этого из разрешенных для движения направлений выбирается неконфликтующее подмножество в соответствии с функцией *CreateIntermediatePhase* (рис. 6).

Протокол обмена сообщениями

Алгоритм управления перекрестком основан на динамическом формировании описаний тактов исходя из текущего состояния транспортных потоков. Для получения информации о транспортных потоках контроллер перекрестка периодически, например каждый 10 с, иницирует запрос данных от автомобилей, находящихся в радиусе действия. Каждый автомо-

биль на такой запрос передает необходимые данные, такие как d – расстояние до перекрестка, t – время, проведенное автомобилем ожидая в очереди, и m – маршрут, определяющий дорогу и номер полосы до и после перекрестка. На основе собранных данных контроллер определяет наперед несколько тактов с помощью функции *CreatePhases* (рис. 5). Далее автомобилям *CreateIntermediatePhase* сообщается, в каких направлениях с каких полос разрешено движение согласно текущему такту. Проехав перекресток, автомобили сообщают контроллеру свой идентификатор, что позволяет экономить пропускную способность перекрестка. Как только все автомобили, относящиеся к текущему такту, проехали перекресток, на несколько секунд включается промежуточный такт, рассчитанный с помощью функции (рис. 6), а затем сразу следующий основной такт. При каждом переключении такта выполняется передача широковещательного сообщения с информацией о разрешенных для движения направлениях. Описанный процесс продолжается циклически.

Моделирование

Для определения эффективности предлагаемого алгоритма и сравнения его с классическими методами светофорного регулирования перекрестком был проведен ряд экспериментов в авторской среде моделирования. Были созданы модели перекрестков двухполосных и трехполосных дорог (рис. 7). Для каждого перекрестка выполнялись запуски с различной

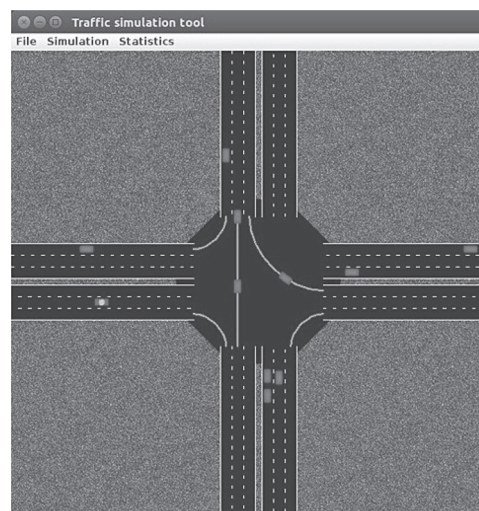


Рис. 7. Пример перекрестка трехполосных дорог в системе моделирования

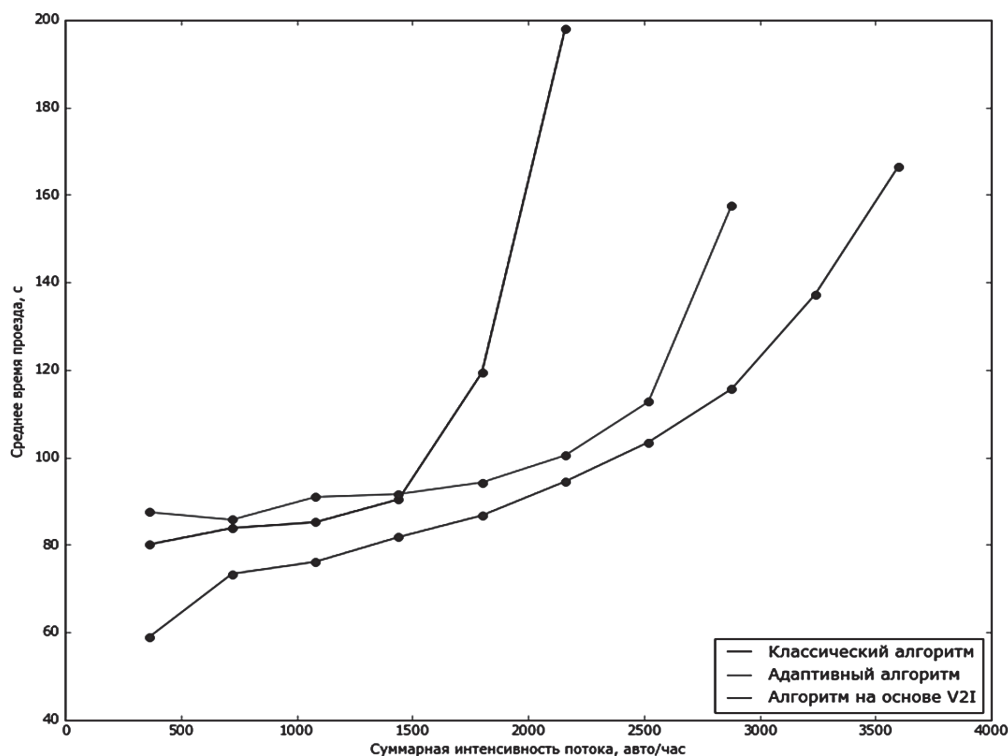


Рис. 8. Зависимость среднего времени проезда перекрестка от суммарной интенсивности транспортных потоков

интенсивностью транспортных потоков и различными формами нагрузки: равномерной, когда интенсивность одинакова с различных направлений, и неравномерной, когда с одного из направлений прибывает в два раза больше автомобилей, чем с остальных.

В качестве показателя эффективности алгоритма было выбрано среднее время проезда перекрестка, включая время нахождения на дорогах непосредственно до и после перекрестка. Для сравнения были выбраны два алгоритма управления движением: классическое светофорное регулирование с постоянной длительностью фазы и адаптивное регулирование, когда время фазы в каком-либо направлении движения пропорционально соответствующей интенсивности транспортного потока. Среднее время проезда вычислялось после проведения эксперимента в течение часа модельного времени.

Проведенные эксперименты показали более высокую эффективность алгоритма на основе V2I-взаимодействия по сравнению с остальными. Особенно это проявилось на малых (до 1000 авто/ч) и больших (более 2500–3000 авто/ч) интенсивностях. Это объясняется тем, что на малых интенсивностях разработанный алгоритм позволяет в большинстве случа-

ев обеспечивать безостановочный проезд. На больших интенсивностях, когда классический и адаптивный алгоритмы уже не могут обеспечить необходимую пропускную способность, и начинается постоянный рост очередей и задержки, алгоритм на основе V2I-взаимодействия продолжает справляться и задержка для него растет не так быстро. Результаты экспериментов для трехполосного перекрестка с неравномерной формой нагрузки представлены на рисунке (рис. 8).

Заключение

В работе был представлен оригинальный алгоритм управления движением на перекрестке, в основе которого лежит использование беспроводной связи между автомобилями и дорожной инфраструктурой. Был описан процесс динамического формирования тактов исходя из сведений о транспортных потоках, прибывающих к перекрестку. Для проверки эффективности описанного алгоритма был проведен ряд экспериментов в авторской среде моделирования, в результате которых алгоритм показал хорошие результаты, обеспечив более высокую пропускную способность перекрестка, чем при фиксированном и адаптивном светофорном регулировании. Дальнейшая работа по

улучшению алгоритма заключается в формировании правил динамического распределения автомобилей по полосам в зависимости от со-

стояния транспортных потоков, регулированию скорости автомобилей с целью обеспечения безостановочного проезда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hiertz, G. R.** The IEEE 802.11 Universe / G. R. Hiertz [et al.] // IEEE Communications Magazine. – 2010. – Vol. 48, № 1. – P. 62–70.
2. **Dresner, K. A.** Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management / K. Dresner, P. Stone // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2008. – Vol. 31. – P. 591–656.
3. **Fei, Y.** New vehicle sequencing algorithms with vehicular infrastructure integration for an isolated intersection / Y. Fei, M. Dridi, A. El-Moudni // Telecommunication Systems. – 2012. – Vol 50, № 4. – P. 325–337.
4. **Климович, А. Н.** Современные подходы и алгоритмы управления транспортными потоками / А. Н. Климович, А. С. Рышук, В. Н. Шуть // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2015. – № 3. – С. 252–256.
5. **Cai, S.** Fast Solving Maximum Weight Clique Problem in Massive Graphs / S. Cai, J. Lin // Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 2016. – P. 568–574.
6. **Kumlander, D. A.** new exact algorithm for the maximum-weight clique problem based on a heuristic vertex-coloring and a backtrack search / D. Kumlander // 5th International Conference on Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences. – 2004. – P. 202–208.
7. **Кременец, Ю. А.** Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 279 с.

Поступила
19.05.2018

После доработки
09.07.2018

Принята к печати
30.11.2018

Klimovich A. N. Shuts V. N.

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕКРЕСТКОМ НА ОСНОВЕ V2I-ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

The importance of efficient traffic management problem grows every year. Constantly increasing number of vehicles and traffic volume requires improvement of methods and algorithms of traffic control. Such improvement becomes possible due to the spreading of global navigation and positioning systems, the development of wireless communication technologies and mobile internet, the advance in specialized technologies for interaction between vehicles and road infrastructure (V2I), the enhancement of machine learning models, computer vision algorithms, the emergence of driverless cars. This paper considers the novel approach to traffic management at intersection based on the use of V2I communication, describes general scheme of such approach and differences with conventional traffic light regulation. Developed algorithm of intersection management utilizes advantages of V2I communication to increase throughput of the intersection comparing to simple traffic light regulation and more advanced adaptive methods. The increase of throughput is achieved due to the dynamic construction of regulation phases which can be done because of more complete information about traffic flow. The comparison of various methods of regulation was performed in developed traffic simulation environment based on multi-agent approach.



Климович Андрей Николаевич закончил с отличием Брестский государственный технический университет по специальности «Искусственный интеллект» (2014), получил степень магистратура по той же специальности (2017). Научные интересы: интеллектуальные транспортные системы, искусственный интеллект, машинное обучение.

Klimovich Andrei graduated with honors from Brest State Technical University with a speciality in «Artificial intelligence» (2014), received master degree with the same speciality (2017). Scientific interests: intelligent transport systems, artificial intelligence, machine learning.



Шуть Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета. Автор более двухсот работ, двух монографий, 25 патентов на изобретения. Научные интересы: интеллектуальные транспортные системы, беспилотный транспорт (30 публикаций и один патент), теория графов (20 публикаций), оптимизационные задачи дискретной математики (30 публикаций).

Shuts Vasilii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Intellectual Information Technologies of the Brest State Technical University. Author of more than two hundred works, two monographs, 25 patents for invention. Scientific interests: intelligent transport systems, unmanned transport (40 publications), adaptive control systems for transport flows (30 publications and one patent), graph theory (20 publications), optimization problems of discrete mathematics (30 publications).

УДК 621.396

В. Э. МАРКЕВИЧ, В. В. ЛЕГКОСТУП

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ ПЕРЕХВАТА АЭРОБАЛЛИСТИЧЕСКОЙ ЦЕЛИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОМ СЕКТОРЕ НАВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ

ОАО "АЛЕВКУРП"

Рассматривается усовершенствованный вариант алгоритма, реализующего метод пропорциональной навигации для наведения зенитных управляемых ракет в ограниченном секторе углового сопровождения, связанного с линией визирования аэробаллистической цели и обеспечивающие устойчивое наведение ракеты с максимальными углами упреждения, не превышающих предельно допустимых. Приводятся аналитические выражения, описывающие алгоритм формирования команд управления и сигналов коррекции, адаптивных к параметрам движения, реализующий сопровождение и наведение ракеты в широком диапазоне дальностей, высот и скоростей движения объекта перехвата. Представлены результаты математического моделирования задачи пространственного перехвата аэробаллистической цели, а также сравнительный анализ и предварительная оценка точности наведения существующих классических и модифицированных вариантов метода пропорциональной навигации.

Ключевые слова: модифицированный метод пропорциональной навигации, станция наведения ракет, зенитная управляемая ракета, сектор углового сопровождения, маневрирующая аэробаллистическая цель, пространственная модель движения ракеты, ошибки наведения.

Введение

Большинство современных алгоритмов управления ракетами (зенитными, авиационными, противоракетными, противоспутниковыми, противокорабельными и др.), предназначенных для поражения различного класса целей, базируются на различных вариантах метода пропорциональной навигации (МПН), как частном случае метода наведения в фактическую (мгновенную) точку встречи.

Согласно данному методу, кинематические нормальные ускорения ракеты должны быть пропорциональны угловой скорости вращения (УСВ) линии визирования (ЛВ) ракета – цель. В векторной форме выражение для заданных ускорений ракеты в общем виде имеет следующий вид:

$$\mathbf{W}_p = N_0 [\boldsymbol{\omega}_0 \times \Delta \mathbf{v}], \boldsymbol{\omega}_0 = \frac{[\Delta \mathbf{v} \times \Delta \mathbf{r}]}{\Delta r^2}, \quad (1)$$

где $\mathbf{W}_p = (0 \ W_{py} \ W_{pz})^T$ – вектор управляющих ускорений ракеты в проекциях на оси системы координат (СК), связанной с ЛВ ракета – цель; $\boldsymbol{\omega}_0 = (\omega_{0x} \ \omega_{0y} \ \omega_{0z})^T$ – вектор УСВ ЛВ ракета –

цель в проекциях на оси СК, связанной с ЛВ; $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$ – вектор разности скоростей сближения ракеты $\mathbf{v}_1$ и цели $\mathbf{v}_2$; $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ – вектор разности декартовых координат ракеты $\mathbf{r}_1$ и цели $\mathbf{r}_2$; $N_0 = f(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2)$ – навигационный параметр, зависящий от параметров движения цели и ракеты, находящийся в пределах $N_0 \in [2; 10]$.

Основными достоинствами разновидности МПН, используемого в зенитных управляемых ракетах (ЗУР) применительно к задаче перехвата скоростных и маневрирующих аэробаллистических целей, являются:

- возможность реализации обстрела с произвольного ракурса, как в переднюю, так и заднюю полусферу атаки;
- формирование траектории наведения, обеспечивающей наведение на прямолинейно летящую цель с минимальными перегрузками;
- слабая чувствительность метода к величине флуктуационной ошибки измерения угловых координат цели (в отличие от трехточечных методов телеуправления).

Вместе с тем, существует ряд особенностей данного метода, снижающие в некоторых тактических ситуациях его эффективность:

- высокая чувствительность МПН к неконтролируемым случайным внешним возмущениям по нормальным ускорениям (например, непредвиденный маневр цели), зависящая от величины навигационного параметра метода;

- увеличение кривизны траектории при отсутствии сигналов компенсации систематических возмущающих воздействий (ускорение свободного падения, продольное ускорение ракеты);

- значительные углы упреждения ракеты относительно линии визирования (ЛВ) цели, движущейся с большими угловыми скоростями относительно станции наведения ракет (СНР), достигающие на начальном участке траектории величины (30...40) градусов.

Впервые МПН в современной формулировке был предложен в [1, 2] применительно к задаче наведения управляемых ракет. Для простейших моделей перехвата (без учета связи каналов наведения, многомерности и нелинейности уравнений кинематики относительного движения) были получены аналитические соотношения, позволяющие выполнять анализ динамических свойств закона управления в идеальных условиях.

Дальнейшему развитию теории МПН посвящены работы [3–5], где было получены уравнения обобщенных методов самонаведения, обеспечивающих движение авиационной управляемой ракеты в фактическую точку встречи с маневрирующей целью при минимальных затратах энергии, исследованы свойства МПН в зависимости от аэродинамической компоновки ракеты, ее аэродинамического качества и угла упреждения, а также приближенно исследована динамика линейной и нелинейной одноканальной системы самонаведения.

В работах [6, 7, 8] для случая плоского перехвата цели в линейном приближении получены типовые законы оптимального управления при различных формах квадратичного функционала качества, в том числе – с учетом стохастического характера ускорения маневрирующей цели. При этом алгоритм расчета управляющих ускорений, в зависимости от используемого критерия оптимальности, может принимать следующий вид [6, 7, 8]:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_p &= N_0 [\boldsymbol{\omega}_0 \times \Delta \mathbf{v}] + 0.5(3 - \alpha_u \tau) \hat{\mathbf{W}}_u, \\ \mathbf{W}_p &= (N_0 \Delta \mathbf{v} + 0.2k_\gamma \tau \cdot \Delta \mathbf{r}) \times \boldsymbol{\omega}_0, \\ \tau &= -\frac{\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{v}_0}{\Delta \mathbf{v}}, \Delta \mathbf{v}_0 = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\|\Delta \mathbf{v}\|}, N = 3, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\alpha_u = \Delta f_u$ – ширина спектра флуктуаций нормальных ускорений цели; $\mathbf{W}_u$ – вектор ускорений цели; k_γ – коэффициент штрафа на величину промаха в точке встречи, имеющий размерность с^{-2} ; τ – время, оставшееся до момента встречи ракеты с целью (подлетное время).

Современные исследования в данном направлении посвящены синтезу законов наведения, позволяющих более полно использовать априорную статистическую информацию для прогнозирования динамики относительного движения и параметров встречи с целью, адаптации параметров МПН к условиям перехвата.

Например, в работе [9] для повышения точности наведения и снижения величины потребных перегрузок предлагается прогнозировать координаты точки встречи, а также использовать комбинацию метода погони (наведения с нулевым упреждением) на начальном участке и классического МПН – на оставшейся части траектории:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_p &= N_1 \left(k_v \frac{[\Delta \mathbf{v} \times \Delta \mathbf{r}]}{\Delta r^2} + (1 - k_v) \frac{[\mathbf{v}_1 \times \Delta \mathbf{r}]}{\Delta r^2} \right) \times \mathbf{v}_1, \\ k_v &= \frac{|\mathbf{v}_1| \tau}{|\mathbf{Q}(\tau)|}, N_1 = \frac{N_0 |\Delta \mathbf{v}|}{\mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{l}_{x0}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{Q}(\tau)$ – вектор текущей прогнозируемой дальности до упрежденной точки встречи с целью; $\mathbf{l}_{x0} \mathbf{l}_{y0} \mathbf{l}_{z0}$ – ортонормированные вектора, определяющие оси сопровождающего триэдра СК ЛВ.

Величина $\mathbf{Q}(\tau)$ при постоянном относительном ускорении цели $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a}_2 - \mathbf{a}_1$, где $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ – оценка вектора ускорений ракеты и цели в СК ЛВ, может быть определена из условия $\Delta \mathbf{r}(\hat{\tau}) \cdot \Delta \mathbf{v}(\hat{\tau}) = 0$ в виде решения квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{v}(\Delta \mathbf{r} + \Delta \mathbf{v} \cdot \tau + 0.5 \Delta \mathbf{a} \cdot \tau^2) &= 0, \\ \hat{\tau} &= \frac{-\Delta \mathbf{v}^2 \pm \sqrt{(\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{v})^2 - 2 \cdot (\Delta \mathbf{a} \cdot \Delta \mathbf{v}) \cdot (\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{v})}}{(\Delta \mathbf{a} \cdot \Delta \mathbf{v})}, \\ \boldsymbol{\Theta}(\hat{\tau}) &= \Delta \mathbf{r} + \Delta \mathbf{v} \cdot \hat{\tau} + 0.5 \Delta \mathbf{a} \cdot \hat{\tau}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Для случая $\Delta \mathbf{a} = 0$ выражение (4) упростится и примет вид:

$$\mathbf{\Theta} = \frac{\Delta \mathbf{r}(\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{v}) - \Delta \mathbf{v}(\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{v})}{(\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{v})} = \frac{[\Delta \mathbf{v} \times \Delta \mathbf{r}] \times \Delta \mathbf{v}}{(\Delta \mathbf{v} \cdot \Delta \mathbf{v})}. \quad (5)$$

Проектируя компоненты вектора $\mathbf{Q}$ из выражения (3) на оси СК ЛВ, получим:

$$\mathbf{W}_p = N_1 \left(k_v [\boldsymbol{\omega}_0 \times \mathbf{v}_1] + (1 - k_v) \frac{\mathbf{M}_3 \mathbf{v}_1}{|\Delta \mathbf{r}|} |\mathbf{v}_1| \right), \quad (6)$$

где $\mathbf{M}_3$ – матрица связи СК ЛВ и СК, связанной со строительными осями ЗУР (СвСК).

В работе [10] в рамках линейной квадратично – гауссовской задачи с учетом инерци-

онности ЗУР получены соотношения для оптимального закона перехвата маневрирующей цели на основе одноканальных моделей 2...4-го порядков в декартовой СК применительно к задаче наведения противоракеты семейства «Стандарт» RIM-161A (SM-3 Block I), предназначенной для уничтожения воздушных целей, в том числе баллистических ракет и боеголовок на заатмосферных высотах, а также спутников на высотах до 250 км. При синтезе введено допущение об отсутствии связи каналов, стационарности системы управления, а также известных оценках фактических ускорений ракеты и цели в СК ЛВ [10]:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_p &= \bar{N} \left(\Delta \mathbf{r} + \Delta \mathbf{v} \tau + 0.5 \mathbf{a}_2 \tau^2 + \gamma_\tau \mathbf{a}_1 \right), \\ \bar{N} &= \frac{6\tau^2 (\xi_\tau + \exp(-\xi_\tau) - 1)}{\xi_\tau^2 \left(\frac{6}{bT^3} + (3 + 6\xi_\tau - 6\xi_\tau^2 + 2\xi_\tau^3 - 12\xi_\tau \exp(-\xi_\tau) - 3\exp(-2\xi_\tau)) \right)}, \\ \gamma_\tau &= -T^2 (\xi_\tau + \exp(-\xi_\tau) - 1), \xi_\tau = \frac{\tau}{T_p}, \end{aligned}$$

где T_p – постоянная времени ракеты при аппроксимации ее передаточной функции апериодическим звеном (как правило, T_p может изменяться в процессе наведения); $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ – вектор текущих (измеренных) ускорений ракеты и цели соответственно; b – коэффициент штрафа за промах на конечном участке наведения.

В работе [11] методами синергетической теории оптимального управления получены в замкнутой форме аналитические выражения, реализующие оптимальный закон перехвата цели на основе многомерной нелинейной многосвязной модели кинематики относительного перемещения ракеты и цели, учитывающий ускорения маневра цели и текущие ускорения ЗУР.

Все перечисленные закона оптимального перехвата в рамках используемых моделей дают приемлемые для практической реализации алгоритмическую сложность и вычислительные затраты в предположении отсутствия ограничений, налагаемых на фазовые координаты, используемые для формирования команд управления. Общим недостатком полученных законов наведения [3, 6, 9, 11] является то, они не позволяют учесть технические ограничения проектируемой системы управления (в том числе – ограничения по нормальным ускоре-

ниям и угловым скоростям вращения, а также угловые ограничения секторов захвата и сопровождения ракеты).

Кроме того, в указанных работах не в полной мере исследована задача компенсации неконтролируемых возмущений, приводящих к росту потребных ускорений ракеты в процессе наведения. Особую актуальность данная проблема приобретает в условиях ограниченных запасов располагаемых ускорений ракеты при больших значениях навигационного коэффициента МПН, в том числе – при совершении целью противоракетного маневра.

В работе [11] сделана попытка учесть нелинейный и многомерный характер полной модели относительного движения материальных точек (цели и ракеты), в том числе – ограничения на фазовые координаты (нормальные ускорения), налагаемые конкретной технической реализацией системы. Однако полученные соотношения требуют введения дополнительных фильтров оценивания для фазовых координат, недоступных непосредственному наблюдению при реализации управления через СНР, а не с борта ЗУР с использованием радиолокационной или оптической головки самонаведения (ГСН).

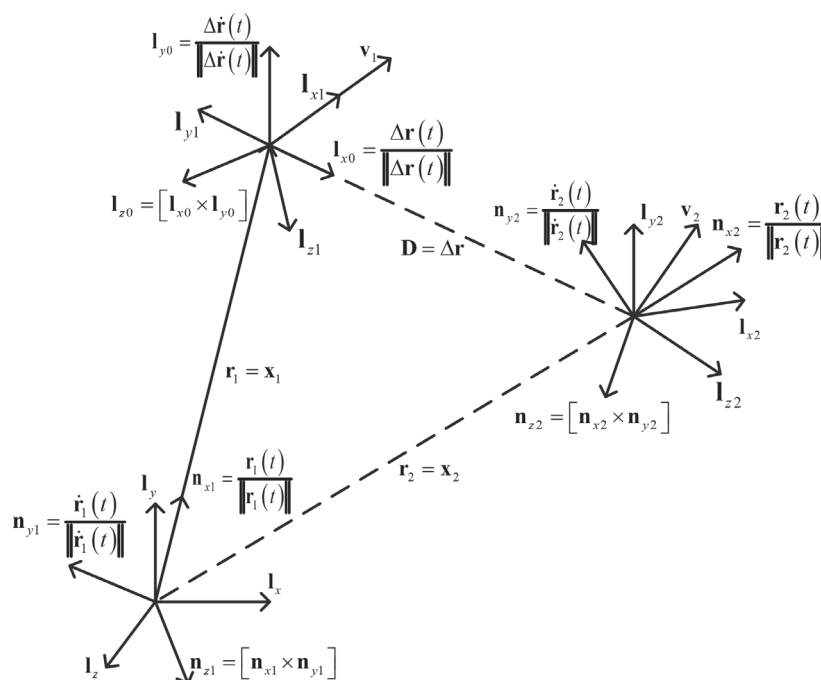


Рис. 1. Геометрия взаимного перемещения ракеты и цели, используемая для получения кинематических уравнений

Необходимость адаптации к ограничениям на сектор углового сопровождения ракеты при использовании методов синергетической теории управления приводит к необходимости дополнительного учета кинематики перемещения ракеты относительно СНР. Это влечет за собой двукратный рост размерности системы уравнений, описывающих нелинейную много-связную динамическую систему в относительном и абсолютном движении. Причем, число взаимозависимых каналов управления увеличивается с двух до четырех, а исходная модель будет описываться системой нелинейных дифференциальных уравнений размерностью 12.

Дополнительно необходимо вводить четыре промежуточных фазовых координаты для учета ограничений – для азимута и угла места, а также нормальных ускорений ЗУР. При этом общее число нелинейных дифференциальных уравнений возрастает до 16.

Кроме того, необходимо будет учитывать алгебраические уравнения связи с помощью матриц Эйлера – Крылова между несколькими системами координат – измерительной (связанной с линией визирования СНР – ЗУР) и относительной (связанной с линией визирования ЗУР – цель).

В качестве иллюстративного примера на рис. 1 приведена геометрия взаимного перемещения ракеты и цели, а также системы координат,

используемые при получении уравнений относительного и абсолютного движения ракеты и цели. Введены следующие обозначения осей сопровождающих (динамических) и статических ортонормированных триэдров, связанных с полюсами соответствующих динамических объектов (СНР, ракеты и цели), взаимное положение которых характеризуется следующими ортами рассматриваемых СК:

l_x, l_y, l_z – орты СК, связанной с фиксированной точкой визирования ракеты и цели, находящейся на земле (как правило, полюс данной СК определяется точкой стояния СНР); l_{x0}, l_{y0}, l_{z0} – орты СК, связанной с ЛВ, характеризующие положение соответствующих осей данной СК; l_{x1}, l_{y1}, l_{z1} – орты СвСК, характеризующий положение продольной и поперечных осей (орт l_{x1} и вектор скорости ракеты можно считать коллинеарными в предположении о малости углов атаки и скольжения ракеты); n_{x1}, n_{y1}, n_{z1} – орты осей измерительной системы координат (ИСК-1), связанной с ЛВ ЗУР; n_{x2}, n_{y2}, n_{z2} – орты осей измерительной системы координат (ИСК-2), связанной с ЛВ цели; $r_1 = x_1, r_2 = x_2$ – вектор радиальной дальности ракеты и цели соответственно; v_1 – вектор скорости ракеты; v_2 – вектор скорости цели; $\Delta v = v_{12}$ – вектор относительной скорости сближения ракета – цель (на рисунке не приведен).

Сопровождающий ортонормированный триэдр СК ЛВ характеризуется тремя ортами, которые связаны соотношениями вида:

$$\mathbf{l}_{x0} = \frac{\Delta \mathbf{r}(t)}{\|\Delta \mathbf{r}(t)\|}, \mathbf{l}_{y0} = \frac{\Delta \dot{\mathbf{r}}(t)}{\|\Delta \dot{\mathbf{r}}(t)\|}, \mathbf{l}_{z0} = [\mathbf{l}_{x0} \times \mathbf{l}_{y0}]. \quad (7)$$

Аналогичные соотношения связывают орты сопровождающих триэдров остальных динамических СК (например, СвСК ракеты и цели).

В качестве примера ниже приведен один из вариантов исходной нелинейной модели перехвата для синтеза методом АКАР, учитывающей действующие технические ограничения на сектор сопровождения ракеты.

Уравнения относительного движения ЗУР:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_2 &= \omega_{z2}, \\ \dot{\phi}_2 &= \frac{\omega_{y2}}{\cos(\theta_2)}, \\ \dot{W}_{y2}^* &= k_y (W_{y2} - \operatorname{tg}(W_{y2}^*)), \\ \dot{W}_{z2}^* &= k_z (W_{z2} - \operatorname{tg}(W_{z2}^*)), \\ \dot{\omega}_{z2} &= \frac{W_{yp}^* - 2|\dot{D}|\omega_{z2}}{D} - \omega_{y2}^2 \operatorname{tg}(\theta_2), \\ \dot{\omega}_{y2} &= \frac{-W_{zp}^* - 2|\dot{D}|\omega_{y2}}{D} + \omega_{y2}\omega_{z2} \operatorname{tg}(\theta_2), \\ \dot{W}_{y2} &= \alpha_{yp} (U_y - W_{y2}), \\ \dot{W}_{z2} &= \alpha_{zp} (U_z - W_{z2}), \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения движения ЗУР относительно СНР:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_j &= \omega_{zj}, \\ \dot{\beta}_j &= \frac{\omega_{yj}}{\cos(\varepsilon_j)}, \\ \dot{\varepsilon}_j^* &= k_\varepsilon (\varepsilon_j - \operatorname{tg}(\varepsilon_j^*)), \\ \dot{\beta}_j^* &= k_\beta (\beta_j - \operatorname{tg}(\beta_j^*)), \\ \dot{\omega}_{zj} &= \frac{W_{yj} - 2\dot{\rho}_j \omega_{zj}}{\rho_j} - \omega_{yj}^2 \operatorname{tg}(\varepsilon_j^*), \\ \dot{\omega}_{yj} &= \frac{-W_{zj} - 2\dot{\rho}_j \omega_{yj}}{\rho_j} + \omega_{yj}\omega_{zj} \operatorname{tg}(\varepsilon_j^*), \\ \dot{W}_{yj} &= \alpha_{yp} (U_{yj} - W_{yj}), \\ \dot{W}_{zj} &= \alpha_{zp} (U_{zj} - W_{zj}), \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbf{U}_j = \mathbf{M}(\varepsilon_j, \beta_j) \mathbf{M}^T(\theta_2, \phi_2) (U_{jx} \ U_{jy} \ U_{jz})^T,$$

где $\Theta_2 = (\theta_2, \phi_2, \gamma_2)$ – углы ориентации ЛВ БПЛА – цель в декартовой СК, связанной с точкой расположения РЛС наведения БПЛА (РЛСН); $\mathbf{W}_2 = (W_{x2} \ W_{y2} \ W_{z2})^T$ – компоненты вектора линейных (продольных и нормальных) ускорений ракеты в системе координат, связанной с ЛВ (СК ЛВ) ракета – цель; $\boldsymbol{\omega}_2 = (\omega_{x2} \ \omega_{y2} \ \omega_{z2})^T$ – компоненты вектора УСВ ЛВ ЗУР – цель в СК ЛВ РЦ; $D, \dot{D}$ – относительная дальность и скорость сближения ракета – цель; $\alpha_p = T_p^{-1}$ – коэффициент, определяющий инерционные свойства неизменной части объекта управления; T_p – постоянная времени звена, аппроксимирующего динамические свойства ЗУР; U_y, U_z – сигналы (команды) управления на выходе регулятора; $\hat{\mathbf{W}}_u = (\hat{W}_{xu}, \hat{W}_{yu}, \hat{W}_{zu})^T$ – вектор оценок нормальных ускорений цели, полученных в следящем фильтре оценивания параметров движения цели; $W_{yp}^* = (\hat{W}_{yu} - W_{y2}^*)$, $W_{zp}^* = (\hat{W}_{zu} - W_{z2}^*)$ – относительные управляющие нормальные ускорения ЗУР; $\varepsilon_j, \beta_j, \rho_j$ – угол места, азимут и радиальная дальность БПЛА (цели) относительно наземной РЛС; ρ_j – радиальная скорость ЗУР (цели); ω_{yj}, ω_{zj} – УСВ ЛВ СНР – ЗУР (цель) в проекциях на оси измерительной СК, продольная ось которой связана с ЛВ; W_{yj}, W_{zj} – нормальные ускорения ЗУР (цели) в проекциях на оси станционной (измерительной) СК (СтСК); W_{yj}, W_{zj} – команды управления ЗУР (задающие нормальные ускорения цели) на входе фильтра, моделирующего запаздывание в контуре управления ЗУР (динамику маневра цели); $j \in (0, 1)$ – подстрочный индекс переменных состояний: 0 – ЗУР, 1 – цель.

Решение данной задачи возможно в настоящее время исключительно с привлечением положения теории аналитического конструирования агрегированных регуляторов [12, 13]. Однако сложность полученных аналитических соотношений и прогнозируемые трудозатраты на исследование полученных законов методами статистического моделирования могут нивелировать ожидаемый выигрыш от учета технических и технологических нелинейностей (ограничений).

Приведенный ниже материал является попыткой найти компромисс между строгостью, завершенностью научных результатов и практичностью, лаконичностью и прагматичностью

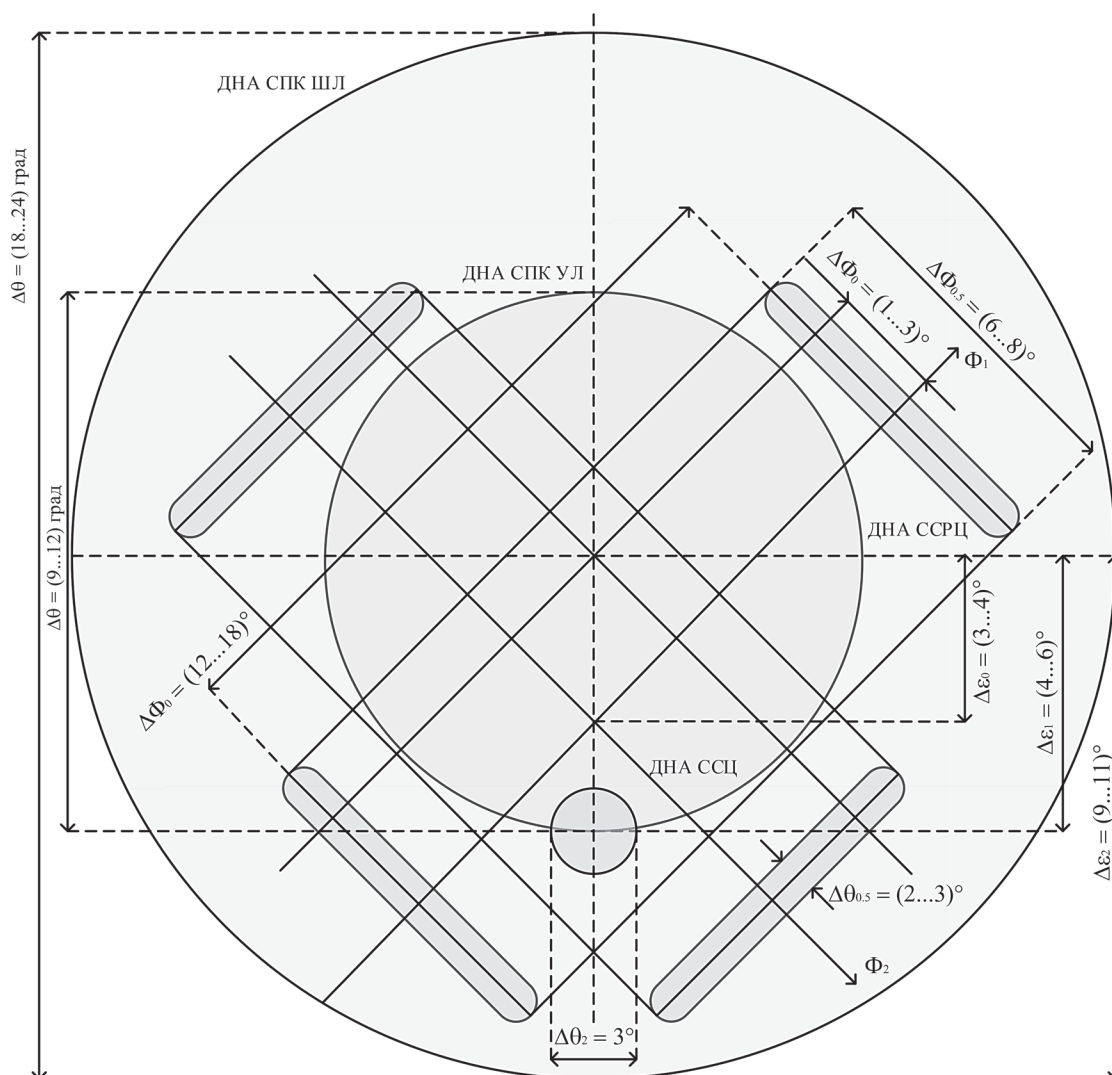


Рис. 2. Сектор углового сопровождения ракет в картинной плоскости, ортогональной ЛВ СНР – цель

инженерной интерпретации в процессе разработки и практической реализации алгоритмов наведения ракет с учетом реальных технических характеристик неизменной (заданной) части контура управления.

Постановка задачи

Сектор сопровождения ЗУР в картинной плоскости представлен на рис. 2. Сечения сектора сопровождения образовано пересечением диаграмм направленности антенн (ДНА) станции сопровождения цели неподвижным лучом (ССЦ), станции сопровождения ракеты и цели с линейным сканированием (ССРЦ) и станции передачи команд (СПК) узкого и широкого луча (УЛ и ШЛ) с плоскостью, ортогональной оптической оси антенн (ЛВ цели). Угловые размеры соответствующих секторов, а также обозначения антенн приедены на рисунке.

Задача заключается формировании управляющих команд таким образом, чтобы обеспечить удержании ракеты в пределах сектора сканирования ССРЦ, образованного следом от перемещающихся в пространстве главных лучей ДНА с размерами по угловым координатам $\Delta\Phi_1 \times \Delta\Phi_2 = (13 \times 13)^\circ$.

Из рисунка можно определить, что угловые размеры сектора сопровождения относительно ЛВ цели составляют величину

$$\Delta\Phi_1 \times \Delta\Phi_2 = (-4...9)^\circ \times (-9...4)^\circ. \quad (10)$$

При этом должно быть обеспечено выполнение следующих требований к методу наведения:

- угловое упреждение (отставание) ракеты относительно ЛВ цели не должно превышать указанных выше значений;
- величина флуктуационных и кинематических нормальных ускорений (величины УСВ

ЛВ РЦ) в процессе наведения должна быть минимальна (либо обеспечивать требуемую величину скорости ЗУР в точке встречи);

– величина мгновенного линейного промаха и скорости его изменения в точке встречи не должны превышать допустимых значений, определяемых характеристиками боевой боевого снаряжения ракеты.

Выполнение первого и последнего требований является безусловным, так как выход ЗУР за пределы сектора сопровождения приведет к потере ответного сигнала и срыву процесса наведения.

Нулевые значения промаха и его производной в точке встречи обеспечиваются соответствующим выбором коэффициентов штрафа при фазовых координатах.

Второе требование обусловлено тем, что величина потребных нормальных ускорений ракеты зависит не только от неконтролируемых внешних ускорений (ускорения маневра, свободного падения, продольного ускорения ЗУР), но и от значения навигационного коэффициента, которая выражается следующим образом [17]:

$$W_p(t) = \frac{N_0}{N_0 - 2} \left(1 - \left(\frac{D}{D_1} \right)^{N_0 - 2} \right) W_u, \quad (11)$$

где D , D_1 – текущая дальность и дальность начала маневра цели соответственно; W_u – ускорения маневра цели.

При ограничении ускорений ракеты будет происходить неконтролируемый рост промаха h , величина которого с приемлемой для практики точностью определяется как [17]:

$$h = \frac{W_u D_1^2}{2|\dot{D}|} \left(1 - \frac{W_p}{W_{mp}} \right) \left(1 - \frac{W_p}{W_{mp}} \right)^{\frac{2}{N_0 - 2}}, \quad (12)$$

где W_p – максимальные ускорения, развиваемые ракетой; W_{mp} – требуемые для наведения МПН ускорения ракеты; $\dot{D}$ – относительная скорость сближения ракеты и цели.

Математическая формулировка указанных выше технических требований записывается в виде:

$$J = C_h h^2(T) + C_v V^2(T) + \int_0^T (C_\phi F(\Delta\phi) + C_w W_p^2(t)) dt, \quad (13)$$

где h , V – соответственно линейных промах и скорость его изменения в точке встречи;

$F(\Delta\phi)$ – нелинейная функция сигнала $\Delta\phi$ углового рассогласования ракета – цель в картинной плоскости; $W_p(t)$ – нормальное ускорение ракеты; C_h, C_v, C_w, C_ϕ – весовые коэффициенты штрафов на текущее и конечное рассогласование и величину сигнала управления; T – время наведения ракеты.

Синтез оптимального закона перехвата вариационными методами приводит к необходимости решения двухточечной краевой задачи (ДТКЗ) в процессе наведения в реальном масштабе времени. Использование методов синергетической теории управления, как было отмечено выше, хоть и позволяет получить оптимальное решение для задачи перехвата в замкнутой алгебраической форме, однако громоздкость аналитических выражений и объем требуемых вычислений для оценки фазовых координат, наряду со сложностью получения методики для практического анализа точности и динамических свойств, существенно снижает прикладную ценность результатов синтеза.

Исходя из вышеизложенного, рассмотрим инженерный метод решения задачи синтеза метода наведения, который предполагает использование эвристического подхода¹ для обеспечения перечисленных выше технических требований с учетом структурных ограничений [14]. Перечислим возможные варианты решения задачи наведения ЗУР в условиях ограниченного сектора сопровождения:

– формирование дополнительных (наряду с сигналами компенсации продольного ускорения, сил тяжести и маневра цели) корректирующих сигналов в контуре оценки УСВ ЛВ РЦ, зависящих от текущего углового упреждения

¹ Алгоритм решения задачи, включающий практический метод, не являющийся гарантированно точным или оптимальным, но достаточный для решения поставленной задачи. Позволяет ускорить решение задачи в тех случаях, когда точное решение не может быть найдено. Эвристический алгоритм – это алгоритм решения задачи, правильность которого для всех возможных случаев не доказана, но про который известно, что он даёт достаточно хорошее решение в большинстве случаев. В действительности может быть даже известно (то есть доказано) то, что эвристический алгоритм формально неверен. Его всё равно можно применять, если при этом он даёт неверный результат только в отдельных, достаточно редких и хорошо выделяемых случаях или же даёт неточный, но всё же приемлемый результат. Проще говоря, эвристика – это не полностью математически обоснованный (или даже «не совсем корректный»), но при этом практически полезный алгоритм.

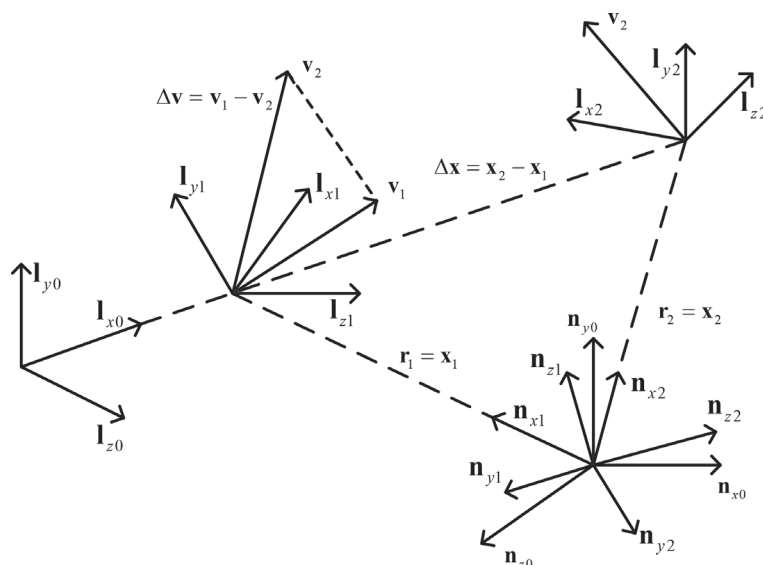


Рис. 3. Системы координат, используемые при рассмотрении взаимного перемещения ракеты и цели

относительно ЛВ СНР – цель, на основе простейших схем регулирования, например, нелинейных модификаций классического пропорционально – интегрального – дифференцирующего (ПИД) регулятора;

- расчет кинематической (заданной) УСВ ЛВ РЦ по расчетным кинематическим угловым координатам ЗУР с последующим сравнением заданной и фактической УСВ ЛВ РЦ и плавным переходом на классический МПН;

- комбинированное управление за счет плавного сопряжения траекторий трехточечных (полное или частичное спрямление траектории, метод параллельного сближения) и двухточечных методов наведения (например, МПН);

- комбинированное управление с использованием наведения с постоянным (переменным) углом упреждения (метод погони) на начальном участке и МПН – на конечном участке;

- использование переменного навигационного коэффициента в выражениях для МПН, адаптивного к прогнозируемым параметрам встречи, позволяющего опосредованно управлять величиной углового упреждения;

- использование упрощенной эталонной модели движения ракеты для прогнозирования и предварительной оценке максимальных углов упреждения с целью последующей коррекции параметров МПН (навигационного коэффициента или сигнала компенсации);

- комбинация двух или более перечисленных способов на различных этапах наведения.

Ввиду ограниченного объема публикации из всего перечня эвристических приемов огра-

ничимся детальным рассмотрением подхода, основанного на использовании отдельного контура коррекции по сигналам углового рассогласования совместно с адаптацией навигационного коэффициента к параметрам наведения.

Модификация МПН для ограниченного сектора углового сопровождения ЗУР

Геометрия задачи пространственного наведения ракеты на цель представлена на рисунке 2. Обозначения осей сопровождающих (динамических) и статических ортонормированных триэдров, связанных с полюсами соответствующих объектов (СНР, ракеты и цели), соответствуют приведенным ранее.

Общее выражение для модифицированного МПН с использованием контура коррекции в общем случае имеет следующий вид (для вертикального канала наведения):

$$\begin{aligned}
 W_y &= N_y(t) \left(\omega_z + \Delta \bar{\omega}_z + \sum_{j=0}^2 \Delta \omega_{zj} \right), \\
 \Delta \dot{\omega}_z &= k_{\omega d} \frac{\partial f(\Delta \varphi_z)}{\partial t} + k_{\omega p} f(\Delta \varphi_z) + \Delta \zeta_z, \\
 \Delta \dot{\zeta}_z &= k_{\omega i} f(\Delta \varphi_z) + k_{\omega l} \delta \omega_z, \\
 \delta \dot{\omega}_z &= k_{\beta \omega} \left(\left(\Delta \omega_z - k_z \tanh \left(\frac{\Delta \omega_z}{k_z} \right) \right) - \delta \omega_z \right), \\
 \Delta \dot{\bar{\omega}}_z &= k_{\omega \alpha} \left(k_z \tanh \left(\frac{\Delta \omega_z}{k_z} \right) - \Delta \bar{\omega}_z \right), \\
 N_y(t) &= N_0(t) |\dot{D}(t)|,
 \end{aligned} \quad (14)$$

Типовые функции могут использовать зоны нечувствительности для плавного ввода сигнала ошибки в контур коррекции:

$$f(\Delta\varphi) = \left(|\Delta\varphi| < \Delta\varphi_0, 0, \varphi_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta\varphi - \Delta\varphi_0 (\Delta\dot{\varphi}) \operatorname{sign}(\Delta\varphi)}{\varphi_0} \right) \right),$$

или

$$f(\Delta\varphi) = \left(|\Delta\varphi| < \Delta\varphi_0, 0, \sum_{j=0}^3 \kappa_j (\Delta\varphi - \Delta\varphi_0 (\Delta\dot{\varphi}) \operatorname{sign}(\Delta\varphi))^j \right),$$

где $\Delta\varphi_0 (\Delta\dot{\varphi})$ – смещение гистерезисного типа относительно нулевого значения сигнала рас- согласования, при котором включается нелинейный контур коррекции; κ_j – постоянные полиномиальные коэффициенты.

Рассмотрим возможные варианты поэтапного расчета управляющих ускорений ЗУР. Первый вариант представляет собой векторную форму алгоритма расчета УСВ в проекциях на оси СК ЛВ и описывается следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \omega_2 &= \mathbf{M}_2 \cdot (\omega_0 + \Delta\bar{\omega}) + \sum_{j=0}^2 \Delta\omega_j, \omega_0 = \frac{[\Delta\mathbf{x} \times \Delta\mathbf{v}]}{(\Delta\mathbf{x}^T \Delta\mathbf{x})}, \\ \Delta\dot{\omega} &= k_{\omega d} \frac{\partial \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z)}{\partial t} + k_{\omega p} \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z) + \Delta\zeta, \\ \Delta\dot{\zeta} &= k_{\omega i} \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z) + k_{\omega l} (\Delta\omega - \tanh(\Delta\omega)), \\ \Delta\dot{\bar{\omega}} &= k_{\omega \alpha} (\tanh(\Delta\omega) - \Delta\bar{\omega}), \\ \Delta\omega_j &= \sum_{j=0}^2 \frac{\Delta\mathbf{W}_j}{2|\dot{D}|}, \end{aligned} \quad (16)$$

где $\Delta\bar{\omega}$ – корректирующая поправка для предотвращения выхода ЗУР за пределы сектора сопровождения; $\Delta\omega_j$ – компенсирующие поправки к фактической УСВ ЛВ, обусловленные возмущающим воздействием внешних ускорений; $\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$ – разность координат цели и ракеты в проекциях на оси земной системы координат (ЗСК); $\Delta\mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$ – разность производных координат цели и ракеты в проекциях на оси ЗСК; $\mathbf{M}_2 = \mathbf{M}_2(\theta_2, \varphi_2)$ – матрица перехода от ЗСК к СК ЛВ, зависящая от углов ориентации ЛВ в ЗСК (θ_2, φ_2) ; $\Delta\mathbf{W}_j$ – поправки для компенсации возмущающего воздействием внешних неконтролируемых ускорений; $|\dot{D}| = |\Delta\mathbf{v}|$ – модуль вектора скорости

сближения; k_{wd}, k_{wp}, k_{wi} – коэффициенты дифференцирующего, пропорционального и интегрирующего каналов коррекции по нормальным ускорениям; $\mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z)$ – векторная функция нелинейного преобразователя на входе ПИД-регулятора; $\mathbf{f}(\Delta\omega) = \tanh(\Delta\omega)$ – векторная функция векторного аргумента гиперболический тангенс.

Управляющие нормальные ускорения определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{p2} &= N(t) \mathbf{M}_3 \left(\omega_2 \times \frac{\mathbf{v}_1}{|\mathbf{v}_1|} \right), N(t) = N_0(t) |\dot{D}_1|, \\ |\dot{D}_1| &= \frac{|\dot{D}|}{\cos(\varepsilon_0) \cos(\beta_0)}, \dot{D} = \frac{\Delta\mathbf{x} \Delta\mathbf{v}}{|\Delta\mathbf{x}|}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\mathbf{M}_3 = \mathbf{M}_3(\Theta_3) = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^T$ – матрица перехода от СК ЛВ к СвСК, зависящая от углов ориентации ЗУР в СК ЛВ $\Theta_3 = (\nu_3, \psi_3, \zeta_3)$, полученных с учетом пространственного крена ракеты при условии идеальной работы системы стабилизации; $N_0(t) \in (2...10)$ – навигационный коэффициент, зависящий от текущих условий наведения и прогнозируемых параметров встречи; $\mathbf{M}_1 = \mathbf{M}_1(\nu_1, \psi_1, \zeta_1)$ – матрица перехода от ЗСК к СвСК, характеризующаяся углами тангажа ν_1 , рыскания ψ_1 и крена ζ_1 ЗУР; ε_0, β_0 – угол места и азимут цели в СвСК ЗУР (углы относительного пеленга).

Альтернативный вариант оценки управляющих ускорений в СвСК выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{p1} &= \mathbf{M}_3 \mathbf{W}_{p2}, \\ \mathbf{W}_{p2} &= N(t) \left(\mathbf{M}_2 \left(\omega_0 \times \frac{\mathbf{v}_1}{|\mathbf{v}_1|} \right) + \Delta\mathbf{W} + \sum_{j=0}^2 \Delta\mathbf{W}_{0j} \right), \\ \Delta\dot{\mathbf{W}} &= k_{wd} \frac{\partial \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z)}{\partial t} + k_{wp} \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z) + \Delta\mathbf{Q}, \\ \Delta\dot{\mathbf{Q}} &= k_{wi} \mathbf{f}(\Delta\varphi_y, \Delta\varphi_z), \end{aligned} \quad (18)$$

где k_{wd}, k_{wp}, k_{wi} – коэффициенты дифференцирующего, пропорционального и интегрирующего каналов коррекции по нормальному ускорению.

Методика расчета компенсирующих (корректирующих) сигналов по нормальным ускорениям $\Delta\mathbf{W}_{0j}$ будет рассмотрена в следующем параграфе.

Формирование корректирующих сигналов

В процессе наведения на ракету, помимо управляющих нормальных ускорений в СК ЛВ, действуют следующие задающие и возмущающие ускорения:

– вектор продольного ускорения ЗУР $\mathbf{W}_{x1}$, обусловленного переменной величиной тяги двигателя и высотным градиентом параметров атмосферы;

– вектор ускорения свободного падения $\mathbf{g}$ в заданной точке пространства;

– вектор ускорения цели $\mathbf{W}_\tau$, вызванный случайным маневром.

С целью компенсации указанных возмущающих воздействий необходимо сформировать соответствующие сигналы компенсации. Для этого обобщим частную методику расчета вектора управляющих ускорений, изложенную в [10, 17]. Запишем в векторной форме уравнения для оценки ускорений, действующих на ЗУР:

$$\mathbf{W}_p = \mathbf{W}_{x1} + \mathbf{W}_p + \mathbf{G}_0 + \mathbf{W}_2, \quad (19)$$

где $\mathbf{W}_{x1} = (W_{x1} \ 0 \ 0)^T$ – вектор продольного ускорения ЗУР; $\mathbf{W}_p$ – вектор фактических нормальных ускорений ЗУР в СК ЛВ; $\mathbf{G}_0$ – вектор ускорения силы тяжести; $\mathbf{W}_2$ – вектор ускорения маневра цели.

Необходимо отметить, что расчет оценки вектора нормальных ускорений цели $\mathbf{W}_2$ является отдельной нетривиальной и специфической задачей, к рассмотрению которой мы вернемся в дальнейших публикациях.

Вектор полных ускорений ЗУР в проекциях на оси СК ЛВ запишется следующим образом:

$$\mathbf{W}_p = k_1 \mathbf{l}_{x0} + k_2 \mathbf{l}_{y0} + k_3 \mathbf{l}_{z0} \quad (20)$$

где $k_1 \dots k_3$ – неопределенные коэффициенты, подлежащие определению

Введем векторные ограничения, которые формулируются следующим образом:

– проекция на продольную ось ЗУР результирующего вектора ускорений равна величине собственного продольного ускорения ЗУР;

– проекция на нормальные к ЛВ оси СК результирующего вектора ускорений ЗУР определяется соответствующими величинами кинематических (заданных) ускорений.

Ограничения в аналитической форме примут следующий вид:

$$\mathbf{W}_p \mathbf{l}_{x1} = W_{x1},$$

$$\mathbf{W}_p \mathbf{l}_{y0} = W_{y0} = +N_0(t) \dot{D} \omega_{z0}, \quad (21)$$

$$\mathbf{W}_p \mathbf{l}_{z0} = W_{z0} = -N_0(t) \dot{D} \omega_{y0}$$

Подставив (20) в (21) и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\mathbf{W}_{p1} = \mathbf{M}_1 \mathbf{W}_{p0},$$

$$\mathbf{W}_{p0} = \mathbf{W}_0 + \left(\frac{W_{x1} - \mathbf{W}_0 \mathbf{l}_{x1}}{\mathbf{l}_{x0} \mathbf{l}_{x1}} \right) \mathbf{l}_{x0} - \mathbf{M}_0 (\mathbf{G}_0 - \mathbf{N}_2^T \mathbf{W}_2), \quad (22)$$

где $\mathbf{W}_{p0} = (W_{px0} \ W_{py0} \ W_{pz0})^T$ – вектор ускорений ЗУР в проекциях на оси СК ЛВ с учетом компенсации возмущающих (внешних) ускорений; $\mathbf{W}_0 = (0 \ W_{y0} \ W_{z0})^T$ – вектор кинематических ускорений в СК ЛВ; $\mathbf{G}_0 = (0 \ -9.81 \ 0)^T$ – вектор ускорения свободного падения в ЗСК, связанной с точкой стояния СНР; $\mathbf{M}_0$ – матрица перехода из ЗСК в СК ЛВ, характеризующаяся вертикальным θ_0 и горизонтальным φ_0 углами ориентации ЛВ РЦ; $\mathbf{N}_2$ – матрица перехода от измерительной СК (ИСК) цели к ЗСК и характеризующаяся углами места и азимута ε_2, β_2 ; $\mathbf{l}_{x0} \mathbf{l}_{x1}$ – произведение определяется первым диагональным элементом матрицы перехода от СК ЛВ к СвСК.

Полученные аналитические соотношения являются обобщением методики оценки команд управления ЗУР, изложенного в [10], и не учитывающего воздействие гравитационного ускорения и ускорения маневра цели.

Метод расчета результирующих управляющих ускорений, основанный на прямой компенсации ускорений без учета ограничения $\mathbf{W}_p \mathbf{l}_{x1} = W_{x1}$ и предполагающий компенсацию возмущающих нормальных ускорений в СК ЛВ, приводит к следующему результату:

$$\mathbf{W}_{p1} = \mathbf{M}_3 (\Theta_3) \mathbf{O}_3 \mathbf{W}_{p0}, \quad \mathbf{W}_{p0} = \mathbf{W}_0 + \Delta \mathbf{W}_0,$$

$$\mathbf{W}_{p0} = \left(\mathbf{W}_0 - \mathbf{M}_0 (\mathbf{G}_0 - \mathbf{N}_2^T \mathbf{W}_2) \right),$$

где $\mathbf{M}_3 (\Theta_3)$ – матрица перехода от СК ЛВ к СвСК, зависящая от вектора углов Θ_3 ; $\mathbf{O}_j$ – единичная матрица размером 3×3 с нулевым j -м диагональным элементом; $\Delta \mathbf{W}_0$ – вектор ускорений, компенсирующих возмущающее воздействие внешних ускорений.

Моделирование показывает, что второй вариант расчета ускорений ЗУР дает некоторый

выигрыш для типовых траекторий наведения (с точки зрения минимизации промаха). Заметные преимущества появляются лишь при обстреле интенсивно маневрирующих целей, а также для целей, движущихся с большими угловыми скоростями.

В дальнейшем для математического моделирования и статистического анализа будем использовать соотношения (18) и (23).

Учет пространственного скручивания измерительной и связанной систем координат

Вследствие пространственного движения ракеты и цели, а также из-за ошибок системы стабилизации ракеты по крену возникает несогласование между осями СК ЛВ и СвСК, что приводит к снижению запасов устойчивости контура наведения и, как следствие, увеличению случайной компоненты мгновенного промаха.

Ошибки системы стабилизации по крену вызваны возмущающим действием момента “косой обдувки” и не превышают в большинстве случаев $(3...5)^\circ$. Пространственный крен ракеты появляется при повороте в двух плоскостях – по рысканию и тангажу.

Пространственный крен ракеты в гироскопной СК (ГСК), или системе координат свободного гироскопа, устраняется системой стабилизации ракеты по крену. Остаточный крен ракеты в СК ЛВ при условии равенства нулю крена в ГСК, называется углом пространственного скручивания [17, 18, 19, 20, 21].

Получим соотношения для расчета углов ориентации СвСК в СК ЛВ при условии работы системы стабилизации ЗУР по крену. Для этого запишем кинематические уравнения для расчета углов ориентации ЗУР в ГСК

$$\dot{\Theta}_4 = M_\omega(\Theta_4)\Delta\omega_3, \quad \dot{\Theta}_4 = \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_4 \\ \dot{\psi}_4 \\ \dot{\gamma}_4 \end{pmatrix},$$

$$M_\omega(\Theta_4) = \begin{pmatrix} 0 & \omega_{y1} & \omega_{z1} \\ 0 & \frac{\cos \gamma_4}{\cos \vartheta_4} & -\frac{\sin \gamma_4}{\cos \vartheta_4} \\ 1 & -\operatorname{tg} \vartheta_4 \cos \gamma_4 & \operatorname{tg} \vartheta_4 \sin \gamma_4 \end{pmatrix}, \quad (24)$$

и преобразуем (при условии равенства угла крена в ГСК нулю $\dot{\gamma}_4 = \gamma_4 = 0$):

$$\dot{\psi}_4 = \frac{\omega_{y1}}{\cos \vartheta_4}, \quad \dot{\vartheta}_4 = \omega_{z1}, \quad (25)$$

где $M_\omega(\Theta_4) = M_\omega(\vartheta_4, \psi_4, \gamma_4)$ – матрица перехода от вектора УСВ, заданного в проекциях на оси соответствующей СК, к производным углов последовательного поворота относительно промежуточных осей (углов Эйлера–Крылова);

Спроецируем последовательно УСВ СвСК на оси неподвижной ГСК и на оси СК ЛВ:

$$\omega_3 = M(\varepsilon_1, \beta_1) M(\vartheta_0, \psi_0)^T M(\vartheta_4, \psi_4)^T \omega_1 \quad (26)$$

где ω_3 – проекции УСВ СвСК на оси СтСК; ϑ_0, ψ_0 – углы ориентации ГСК в ЗСК, определяемые начальными углами ориентации ракеты (фиксируются в момент старта).

Запишем выражения для относительных УСВ ЗУР в СК ЛВ:

$$\Delta\omega_3 = \omega_3 - M_0(\vartheta_2, \varphi_2)\omega_0, \quad (27)$$

где $M_0(\vartheta_2, \varphi_2)$ – матрица перехода от ЗСК к СК ЛВ.

Отсюда несложно получить кинематические уравнения для расчета вектора углов ориентации ЗУР (СвСК) в СтСК Θ_3 при условии идеальной работы системы стабилизации по крену:

$$\dot{\Theta}_3 = M_\omega(\Theta_3)\Delta\omega_3, \quad (28)$$

где Θ_3 – вектор углов ориентации СвСК в СК ЛВ при условии $\dot{\gamma}_4 = \gamma_4 = 0$.

Данные углы используются в матрице поворота для пересчета управляющих ускорений ЗУР, полученных в соответствие с выбранным методом наведения, из СК ЛВ в СвСК, согласно выражению (23):

$$W_{p1} = M_3(\Theta_3)O_3W_{p0}. \quad (29)$$

где $M_1(\Theta_3)$ – матрица перехода от СК ЛВ к СвСК с учетом работы системы стабилизации по крену ЗУР.

Следует напомнить, что МПН может быть реализован как с использованием наземных (СНР), так и бортовых измерителей (полуактивная или активная ГСН). В первом случае для расчета управляющих ускорений используются УСВ и углы тангажа, рыскания и крена СвСК. При этом наведение осуществляется за счет управления ориентацией вектора скорости ракеты.

Во втором случае (при отсутствии датчиков углов атаки на борту) для управления ис-

пользуются УСВ и углы ориентации СвСК (планера ЗУР) в предположении малости углов атаки и скольжения $\alpha, \beta = (3...5)^\circ$ в большинстве практически важных случаев. При этом наведение осуществляется путем управления ориентацией корпуса ракеты.

Математическая модель ЗУР

Для исследования использовалась пространственная модель двухступенчатой ЗУР 5В27Д с ракетными двигателями на твердом топливе (РДТТ), составленная на основе уравнений динамики несимметричного твердого тела с учетом внешних и реактивных сил, не совпадающих в общем случае с продольной осью ЗУР, а также несовпадения полюса СвСК с центром инерции ЗУР (при ненулевых центробежных моментах инерции) [15, 16]. Масса ракеты $m = m(t)$, уменьшающаяся вследствие сгорания твердого топлива, является в нашем случае заданной функцией времени. Предполагается известным закон изменения тяги P_1 двигателей первой и второй ступеней, зависящий от величины суммарного импульса зарядов топлива J_{s1} и J_{s2} .

Полагается известной также функциональная зависимость температуры начальных суммарных импульсов. Задается также функциональная зависимость от массы ракеты радиус – вектора центра инерции $\Delta \mathbf{r}_1(m)$ и тензора инерции $\mathbf{J}_3(m)$ (в дальнейшем для упрощения записи скалярный аргумент векторных и тензорных функций не указывается).

Для учета технологических отклонений при изготовлении планера ЗУР и их влияния на динамику наведения уравнения движения центра масс (ЦМ) и относительно ЦМ удобно записывать в проекциях на оси СвСК. Учет отклонений ЦМ ЗУР относительно центра СвСК, а также поворота главных осей инерции ЗУР, вызванных неточностями изготовления, приводит к усложнению системы уравнений, описывающих пространственное движение ракеты [15, 16]:

$$\begin{aligned} m[\dot{\mathbf{V}}_1 + (\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1) + (\dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1) + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{\omega}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1)] &= \\ &= \mathbf{R}_1 + \mathbf{P}_1 + \mathbf{F}_{c1}, \\ [\mathbf{J}_1 \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 + \dot{\mathbf{J}}_1 \boldsymbol{\omega}_1 + (\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{J}_1 \boldsymbol{\omega}_1) + m \Delta \mathbf{r}_1 (\dot{\mathbf{V}}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1)] &= \\ &= \mathbf{M}_{a1} + (\Delta \mathbf{a}_1 \times \mathbf{P}_1) + (\Delta \mathbf{a}_1 + 0.5 \mathbf{e}_1 L) \times \mathbf{F}_{c1}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\mathbf{P}_1 = -\dot{m} \mathbf{M}(\Delta \vartheta, \Delta \psi) \mathbf{U} = \mathbf{M}(\Delta \vartheta, \Delta \psi) (P_x P_y P_z)^T,$$

$$\mathbf{F}_{c1} = -2(\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{e}_1 m L),$$

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{M}(\Delta \vartheta, \Delta \psi) \mathbf{e},$$

$$\Delta \mathbf{a}_1 = \mathbf{M}(\Delta \vartheta, \Delta \psi) (b \ 0 \ 0)^T,$$

где $\mathbf{V}_1$ – вектор скорости ЗУР в проекциях на оси СвСК; $\Delta \mathbf{r}_1 = (\Delta r_{x1} \ \Delta r_{y1} \ \Delta r_{z1})^T$ – положение смещенного центра масс ЗУР в проекциях на оси СвСК; $\Delta \mathbf{a}_1 = (\Delta a_{x1} \ \Delta a_{y1} \ \Delta a_{z1})^T$ – радиус-вектор точки на оси выходного сечения, имеющий начало в полюсе (центре) СвСК (номинальной СвСК); $\mathbf{e} = (1 \ 0 \ 0)^T$ – единичный вектор, направленный по строительной оси канала двигателя от его выходного сечения к носу ракеты; $\mathbf{e}_1 = (e_{x1} \ e_{y1} \ e_{z1})^T$ – проекция вектора $\mathbf{e} = (1 \ 0 \ 0)^T$ на оси СвСК; P – сила тяги (реактивная сила); $b = b(t) \in (1.2...3.5)$ – расстояние от переменной во времени точки приложения тяги до среза выходного сечения стартового (маршевого) двигателей (для упрощения полагаем, что точка приложения вектора тяги совпадает с центром передней стенки двигателя); $\mathbf{F}_{c1}$ – вектор силы Кориолиса, возникающей при вращении ЗУР и работающем двигателе; $\mathbf{P}_1$ – вектор газодинамических сил (сил реактивной тяги) в проекциях на оси СвСК; $\mathbf{R}_{a1} = \mathbf{R}_{a1}(M)$ – вектор аэродинамических сил в проекциях на оси СвСК, зависящий от числа Маха M ; $\mathbf{M}_{a1} = \mathbf{M}_{a1}(M)$ – результирующий вектор аэродинамических моментов сил в проекциях на оси СвСК, зависящий от числа Маха M ; $\mathbf{J}_1$ – тензор инерции ЗУР как твердого тела в проекциях на оси номинальной СвСК; $\dot{\mathbf{J}}_1$ – матрица, составленная из производных по времени соответствующих компонент тензора $\mathbf{J}_1$; $\mathbf{U}$ – вектор текущей скорости истечения газов на выходе сопла ракетного двигателя в СК, связанной с продольной осью РДТТ (разброс поперечных компонент скорости истечения задается в пределах допусков, зависящих от неравномерности горения заряда твердого топлива).

$$\mathbf{M}_{a1} = \sum_{j=0}^{J-1} [\mathbf{R}_{a1}^j \times \mathbf{L}_{a1}^j] = \mathbf{M}_{s1} + \mathbf{M}_{c1} + \mathbf{M}_{d1} + \mathbf{M}_{h1}, \quad (31)$$

где $\mathbf{R}_{a1}^j$ – j -ая векторная компонента результирующей аэродинамической силы $\mathbf{R}_{a1}$, обусловленная влиянием корпуса, крыльев, рулей

или элеронов ЗУР (определяется силой лобового сопротивления и аэродинамической подъемной силой); $\mathbf{L}_{a1}^j$ – радиус – вектор точки приложения j -ой компоненты суммарной аэродинамической силы $\mathbf{R}_{a1}^j$ относительно центра инерции (масс) ЗУР; $\mathbf{M}_{s1}, \mathbf{M}_{c1}, \mathbf{M}_{d1}, \mathbf{M}_{h1}$ – соответственно вектор стабилизирующих, управляющих демпфирующих и шарнирных моментов аэродинамических сил (реактивные моменты).

Компоненты вектора $\Delta \mathbf{r}_1$ задаются совокупностью нормально распределенных чисел с параметрами $M_{\Delta r} = 0, \sigma_{\Delta r} = 0.002$ м. Тензор инерции $\mathbf{J}_1$ определяется соотношением

$$\mathbf{J}_1 = \mathbf{M}_{31}^T \mathbf{J}_3 \mathbf{M}_{31} + m(\mathbf{E} \Delta \mathbf{r}_1^2 + \Delta \mathbf{r}_1 \Delta \mathbf{r}_1^T),$$

$$\mathbf{M}_{31} = \mathbf{M}(\Delta \phi_{1y}, \Delta \phi_{1z}, \Delta \phi_{1x}), \Delta \mathbf{r}_1^2 = \sum_{j=1}^3 \Delta \mathbf{r}_{1j}^2, \quad (32)$$

где $\mathbf{J}_3$ – тензор инерции в проекциях на оси СвСК, совпадающих с главными осями инерции (составляющие тензора задаются в качестве исходных данных, определяемых в процессе контрольных испытаний для точки действительного положения центра масс ракеты); матрица перехода от номинальной СвСК к СвСК, связанной с главными центральными осями инерции; $\Delta \mathbf{r}_1 \cdot \Delta \mathbf{r}_1^T$ – диадный квадрат вектора $\Delta \mathbf{r}_1$; $\Delta \mathbf{r}_1^2$ – скалярный квадрат вектора $\Delta \mathbf{r}_1$; $\mathbf{E}$ – единичная матрица; $\Delta \phi_1 = (\Delta \phi_{1x}, \Delta \phi_{1y}, \Delta \phi_{1z})$ – вектор углов поворота главных осей инерции относительно осей номинальной СвСК; $\mathbf{M}_{31}$ – матрица перехода от номинальной СвСК, орты которой ориентированы по осям симметрии ЗУР, к СК, связанной с главными центральными осями инерции.

Компоненты вектора $\Delta \phi_1$ определяются технологическими допусками при изготовлении ЗУР и задаются в нашем случае совокупностью нормально распределенных случайных величин с математическим ожиданием (МО) $m_{\Delta \phi} = (-0.01 \dots +0.01)$ рад и среднеквадратическим отклонением (СКО) угла $\sigma_{\Delta \phi} = (0.003 \dots 0.006)$ рад.

В нормальной векторной форме уравнения движения ракеты в общем случае примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 &= m^{-1} [\mathbf{R}_1 + \mathbf{P}_1 + \mathbf{F}_{c1}] - \\ &- ((\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1) + (\dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1) + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{\omega}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1)), \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 &= \mathbf{J}_1^{-1} [\mathbf{M}_{a1} + (\Delta \mathbf{a}_1 \times \mathbf{P}_1) + (\Delta \mathbf{a}_1 + 0.5 \mathbf{e}_1 L) \times \mathbf{F}_{c1}] - \\ &- ((\mathbf{J}_1 \boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{J}_1 \boldsymbol{\omega}_1) + m \Delta \mathbf{r}_1 (\dot{\mathbf{V}}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1)), \end{aligned}$$

где $\mathbf{J}_1^{-1}$ – тензор моментов инерции твердого тела, обратный тензору $\mathbf{J}_1$.

В правых частях уравнений для векторов $\dot{\mathbf{V}}_1$ и $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$ содержатся производные векторов $\boldsymbol{\omega}_1$ и $\dot{\mathbf{V}}_1$ соответственно. Одним из наиболее простых путей разрешения данной проблемы является определение правых частей уравнений для векторов $\dot{\mathbf{V}}_1$ и $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$ путем последовательных приближений. Сначала определяется правая часть для вектора $\dot{\mathbf{V}}_1$ без учета слагаемых, содержащих $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 &= m^{-1} [\mathbf{R}_1 + \mathbf{P}_1 + \mathbf{F}_{c1}] - \\ &- ((\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1) + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{\omega}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1)) = \mathbf{Q}(\mathbf{V}_1, \boldsymbol{\omega}_1, \dot{\boldsymbol{\omega}}_1). \end{aligned}$$

В качестве начального приближения для векторно-матричного уравнения $\dot{\mathbf{V}}_1 = \mathbf{Q}(\mathbf{V}_1, \boldsymbol{\omega}_1, \dot{\boldsymbol{\omega}}_1)$ можно использовать значение $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$, полученное на предыдущем шаге вычислений. Затем определяется правая часть для вектора $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$ с учетом компонент вектора $\dot{\mathbf{V}}_1$, полученных на предыдущем шаге:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 &= \mathbf{J}_1^{-1} [\mathbf{M}_{a1} + (\Delta \mathbf{a}_1 \times \mathbf{P}_1) + (\Delta \mathbf{a}_1 + 0.5 \mathbf{e}_1 L) \times \mathbf{F}_{c1}] - \\ &- ((\mathbf{J}_1 \boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{J}_1 \boldsymbol{\omega}_1) + m \Delta \mathbf{r}_1 (\dot{\mathbf{V}}_1 + \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1)). \end{aligned} \quad (33)$$

После этого определяется вектор $\dot{\mathbf{V}}_1$ с учетом слагаемых, содержащих производные $\dot{\boldsymbol{\omega}}_1$, полученных на предыдущем шаге:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_1 &= m^{-1} [\mathbf{R}_1 + \mathbf{P}_1 + \mathbf{F}_{c1}] - \\ &- ((\boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{V}_1) + (\dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1) + \boldsymbol{\omega}_1 \times (\boldsymbol{\omega}_1 \times \Delta \mathbf{r}_1)). \end{aligned} \quad (34)$$

Процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено достаточная для интегрирования точность приближения.

$$\begin{aligned} \|\dot{\boldsymbol{\omega}}_n - \dot{\boldsymbol{\omega}}_{n-1}\| &= \|\Delta \dot{\boldsymbol{\omega}}_n\| \leq \Delta \dot{\omega}_{\max}, \\ \|\boldsymbol{\omega}_n - \boldsymbol{\omega}_{n-1}\| &= \|\Delta \boldsymbol{\omega}_n\| \leq \Delta \omega_{\max}, \\ \|\Delta \dot{\mathbf{V}}_n\| &= \|\dot{\mathbf{V}}_n - \dot{\mathbf{V}}_{n-1}\| \leq \Delta \dot{V}_{\max}, \\ \|\Delta \mathbf{V}_n\| &= \|\mathbf{V}_n - \mathbf{V}_{n-1}\| \leq \Delta V_{\max}. \end{aligned} \quad (35)$$

где $\Delta \dot{\omega}_{\max}, \Delta \omega_{\max}, \Delta \dot{V}_{\max}, \Delta V_{\max}$ – максимально допустимые погрешности расчета компонент векторов $\ddot{\mathbf{u}}_1, \ddot{\mathbf{u}}_1$ и $\dot{\mathbf{V}}_1, \mathbf{V}_1$ соответственно.

Экспериментальные данные по весовым, центровочным, тяговым, моментным и аэродинамическим характеристикам взяты из эскизного проекта на ЗУР В-601П и отчетов по войсковым стрельбовым испытаниям [18, 19, 20, 21].

Результаты математического моделирования процесса наведения ЗУР на цель

Для оценки эффективности предлагаемой модификации МПН было выполнено математическое моделирование процесса наведения ЗУР на аэробаллистическую цель (например, тактический истребитель, летящий на высокой скорости (более 2.5 М) или совершающий маневр, противорадиолокационная ракета или управляемая / планирующая авиационная бомба) для граничных (экстремальных) по дальности, высоте, параметру и скорости цели точек зоны поражения. На рисунках (5...28) приведены зависимость сферических координат цели ε_2, β_2 , ЗУР ε_1, β_1 , относительных координат ЗУР Φ_1, Φ_2 , а также ускорений ЗУР W_x, W_y, W_z в СкСК от полетного времени.

В процессе моделирования проведен сравнительный анализ точности наведения с использованием существующих МН (метод половинного / полного спрямления траектории – ПС, МПСТ) и вновь разработанной модификации метода пропорциональной навигации (ПН, ММПН) для различных типов траектории полета цели и условий встречи.

Для расчетов использовались типовые структуры измерителей координат цели и ракеты, работающие совместно с системой управления силовыми электрическими следящими приводами антенны сопровождения [18, 19, 20, 21]. СКО флуктуационной ошибки измерения УК цели задавалось равным $\sigma_\varphi = 4$ угл.мин.

Начальные условия сведены в табл. 1, статистические оценки ошибок наведения и мгновенных промахов с использованием различных методов представлены в табл. 2, 3 и характеризуются следующими параметрами:

- координаты точки встречи ракеты с целью $\mathbf{r}_m = (x_m \ y_m \ z_m)^T$ и скорость цели V_δ ;
- используемый метод наведения ЗУР, а также тип и интенсивность маневра цели W_δ ;
- СКО ошибки измерения УК цели σ_φ , определяющее величину флуктуационной перегрузки ЗУР;
- МО и СКО величины мгновенного промаха² $\sigma_\gamma, m_\gamma \ \gamma_0 = \|\dot{\mathbf{a}}\|, \mathbf{h} = (0 \ \gamma_y \ \gamma_z)^T$ и ошибки

наведения (линейного расстояния между ракетой и целью) σ_ζ, m_ζ в картинной плоскости $h_0 = \|\mathbf{h}\|, \mathbf{h} = (0 \ h_y \ h_z)^T$;

– МО и СКО нормальных ускорений ЗУР в СкСК в момент встречи.

Т а б л и ц а 1. Условия наведения и встречи

№	Координаты точки встречи x, y, z , м	Скорость цели, м/с	Тип маневра
1	-2000, 100, 15000	500	нет
2	2000 14000 14000	750	нет
3	25000, 20000, 15000	300	нет
4	20000, 10000, 5000	300	МКП, $8g^3$

Т а б л и ц а 2. Сравнительный анализ ошибок наведения ЗУР на цель в точке встречи

№	m_w, σ_w для W_0 , ММПН / МПСТ, м/с ²	m_ζ, σ_ζ для h_0 , ММПН / МПСТ, м
1	[-65, 06] / [50, 04]	[19, 3] / [24, 5]
2	[55, 05] / [75, 06]	[27, 4] / [37, 3]
3	[09, 07] / [19, 11]	[16, 3] / [39, 5]
4	[45, 08] / [23, 03]	[31, 3] / [18, 4]

Т а б л и ц а 3. Сравнительный анализ мгновенного промаха ЗУР в точке встречи

№	m_w, σ_w для W_0 , ММПН / МПСТ, м/с ²	m_γ, σ_γ для γ_0 , ММПН / МПСТ, м
1	[-65, 06] / [50, 04]	[15, 2] / [21, 4]
2	[55, 05] / [75, 06]	[24, 3] / [32, 3]
3	[09, 07] / [19, 11]	[14, 3] / [35, 4]
4	[45, 08] / [23, 03]	[29, 3] / [16, 3]

Величина мгновенного промаха рассчитывалась по формуле, учитывающей влияние ненулевого нормального ускорения ЗУР в точке встречи:

$$\mathbf{h}_\gamma = \left[\boldsymbol{\omega} \times (\Delta \mathbf{v} + \Delta \mathbf{a} \tau_y) \right] \tau_y, \quad \boldsymbol{\omega} = \frac{\Delta \mathbf{r} \times \Delta \mathbf{v}}{\Delta r^2}, \quad (36)$$

$$\tau_y = \frac{\Delta \mathbf{r} \cdot \Delta \mathbf{v}_0}{\|\Delta \mathbf{v}\|^2}, \quad \Delta \mathbf{v}_0 = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\|\Delta \mathbf{v}\|}, \quad \Delta \mathbf{a} = \Delta \dot{\mathbf{v}},$$

где τ_y – время до встречи с целью (упрежденное время встречи); $\Delta \mathbf{a}$ – вектор относительного ускорения ракета – цель.

в относительном движении будут перемещаться прямолинейно, т.е. пор касательной к относительной траектории.

Эту дальность называют пролетом, или промахом. Возможны и другие меры текущей точности, например, расстояние, на котором ракета пролетит мимо цели, если с данного момента ускорение будет постоянным. В момент времени, когда вектор пролета совпадает с вектором дальности, расстояние между ракетой и целью минимально.

³ Маневр с последовательно выполняемым кабрированием (набором высоты) в течение (8...10) с и пикированием в течение (8...10) с с нормальной перегрузкой цели в СкСК 80 м/с².

² Текущей мерой точности наведения, т.е. величиной, прогнозирующей наименьшее значение модуля относительной дальности, принято считать дальность, на которой ракета пролетит мимо цели, если с данного момента времени ракета и цель

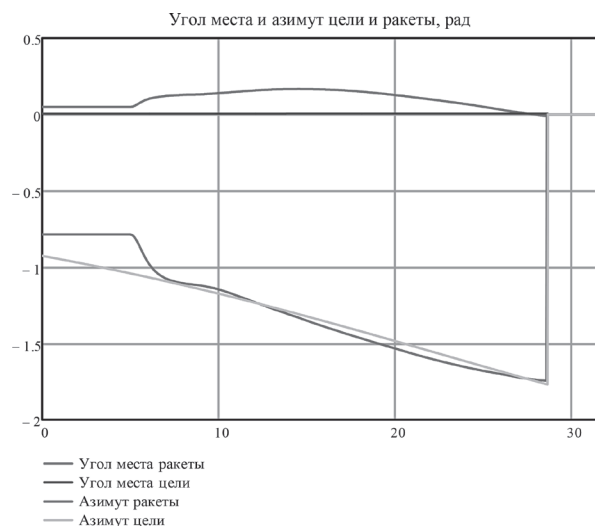


Рис. 5. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом ММПН (траектория 1)



Рис. 7. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом ММПН (траектория 1)

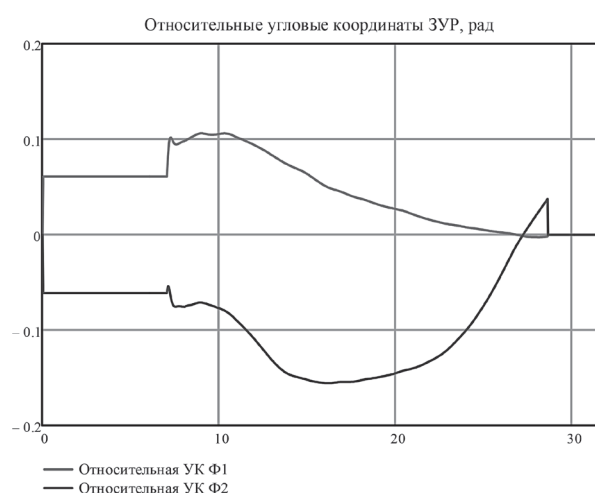


Рис. 9. Относительные координаты ракеты при наведении методом МПСТ (траектория 1)

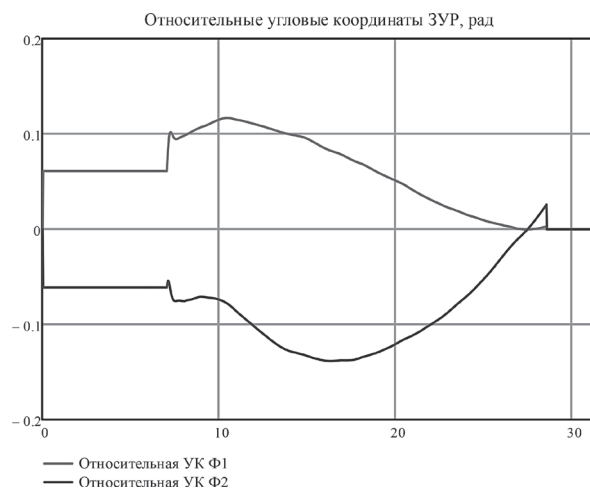


Рис. 6. Относительные координаты ракеты при наведении методом ММПН (траектория 1)

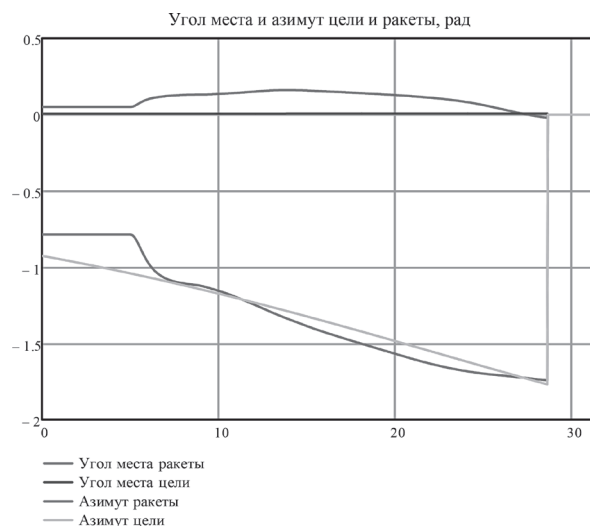


Рис. 8. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом МПСТ (траектория 1)

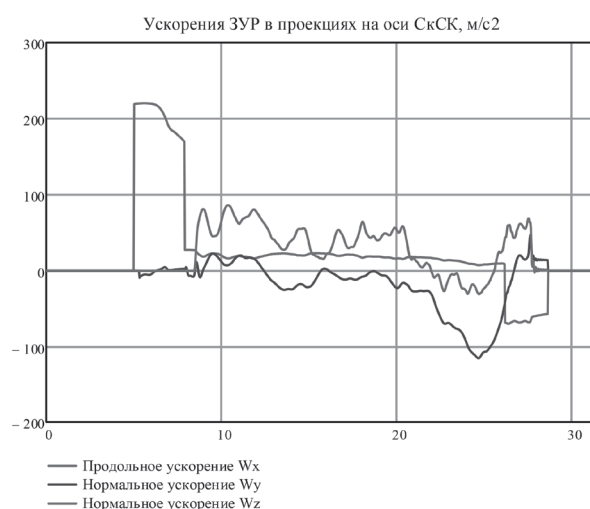


Рис. 10. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом МПСТ (траектория 1)

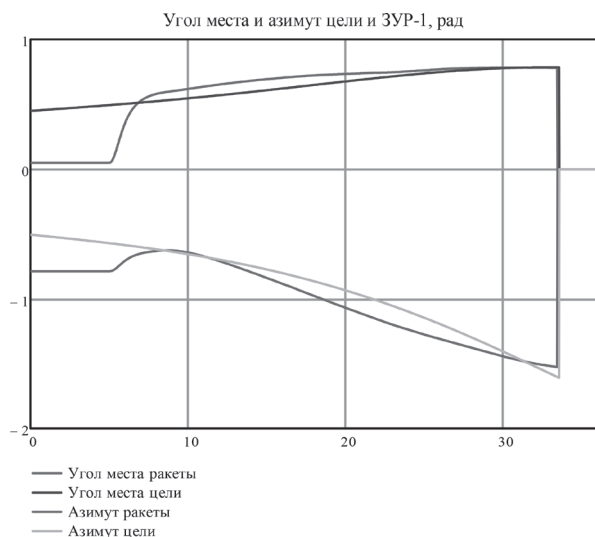


Рис. 11. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом ММПН (траектория 2)



Рис. 13. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом ММПН (траектория 2)

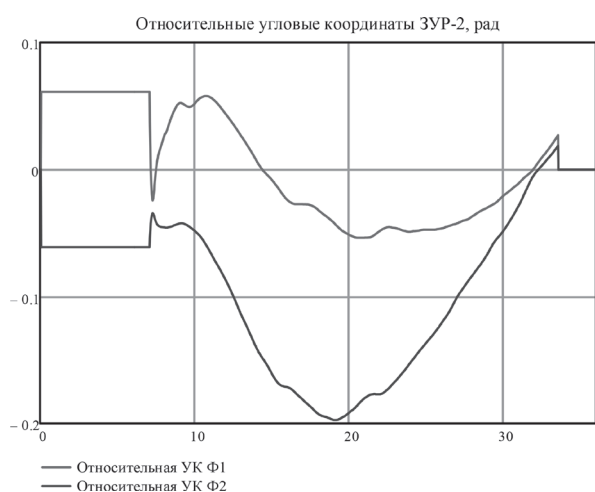


Рис. 15. Относительные координаты ракеты при наведении методом МПСТ (траектория 2)

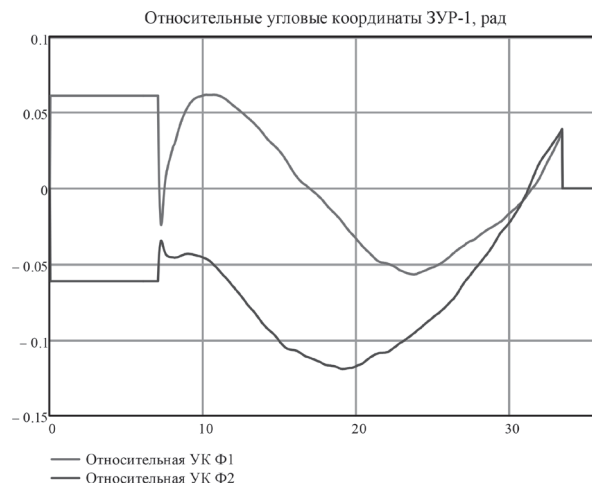


Рис. 12. Относительные координаты ракеты при наведении методом ММПН (траектория 2)

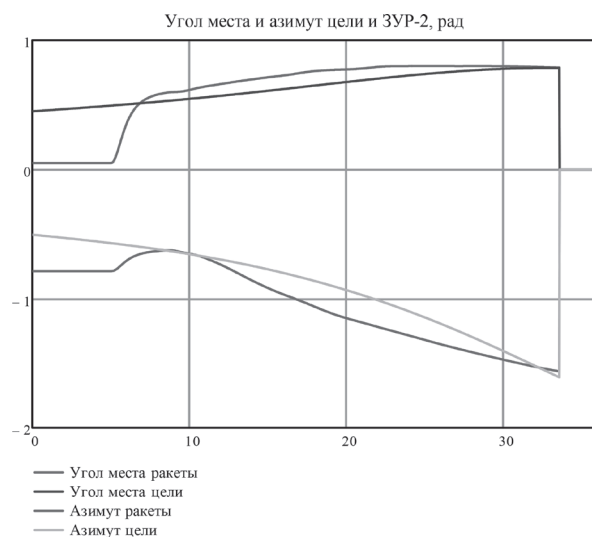


Рис. 14. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом МПСТ (траектория 2)



Рис. 16. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом МПСТ (траектория 2)

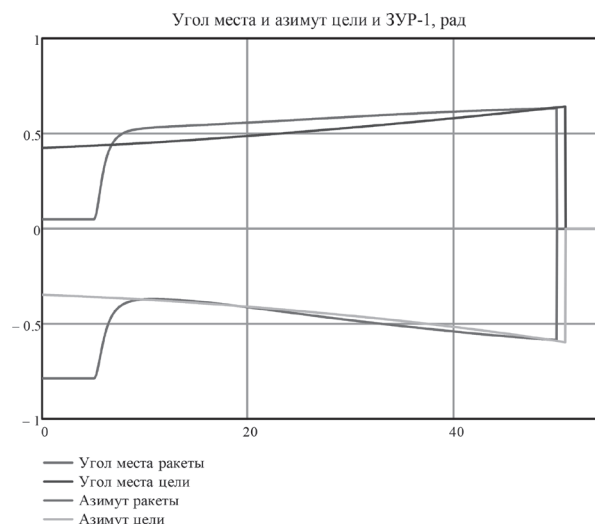


Рис. 17. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом ММПН (траектория 3)

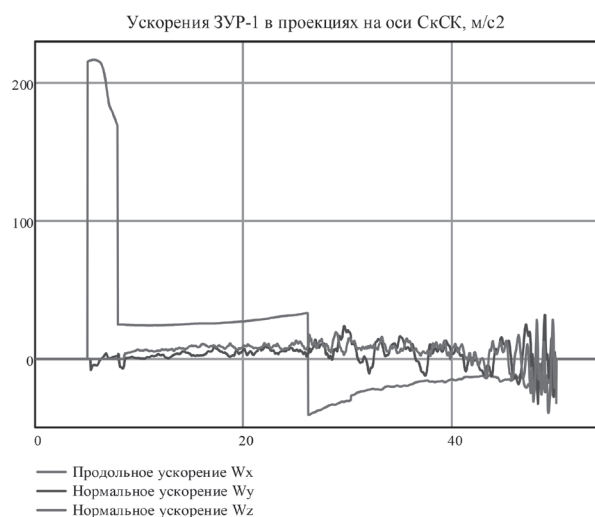


Рис. 19. Ускорения ракеты в СкСК при наведении методом ММПН (траектория 3)

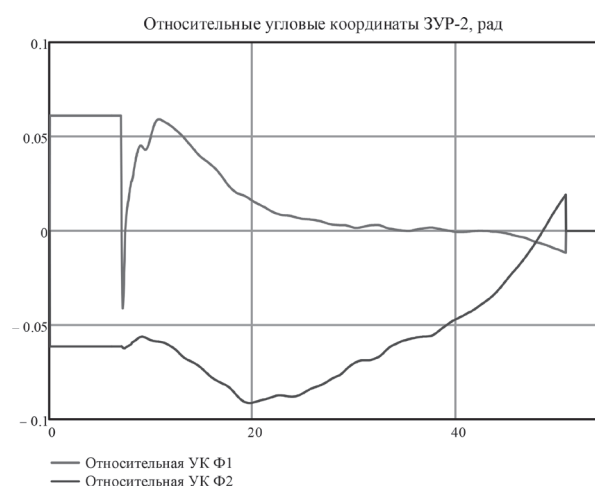


Рис. 21. Относительные координаты ракеты при наведении методом МПСТ (траектория 3)

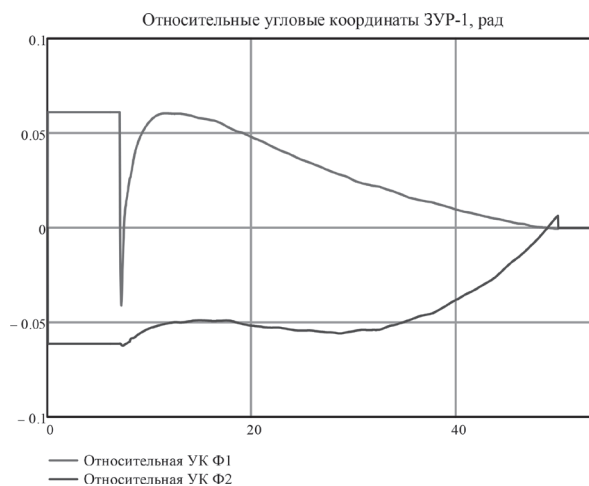


Рисунок 18. Относительные координаты ракеты при наведении методом ММПН (траектория 3)

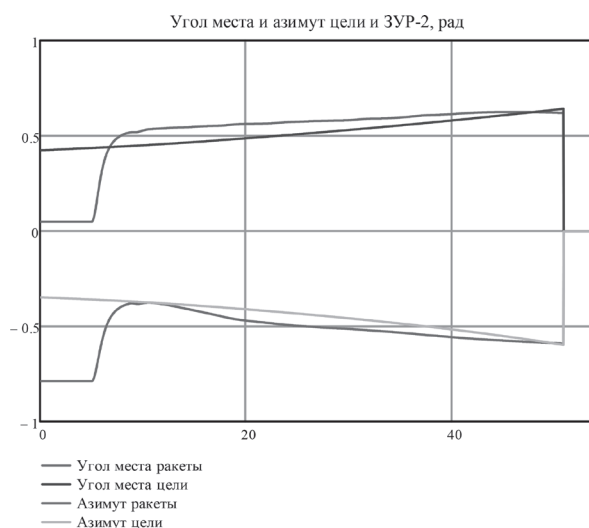


Рисунок 20. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом МПСТ (траектория 3)



Рис. 22. Ускорения ракеты в СкСК при наведении методом МПСТ (траектория 3)

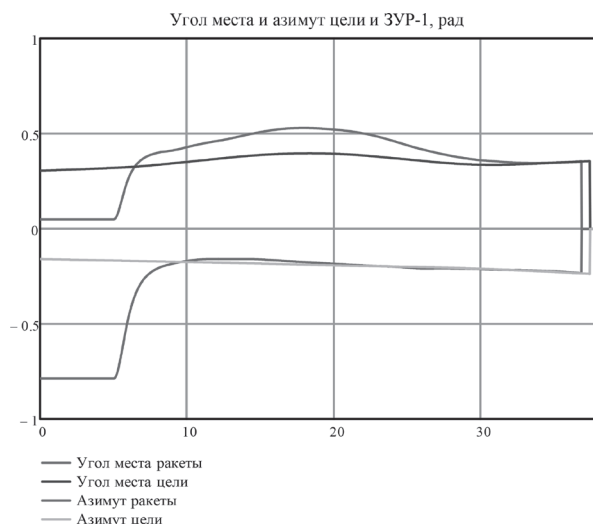


Рис. 23. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом ММПН (траектория 4)



Рис. 25. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом ММПН (траектория 4)

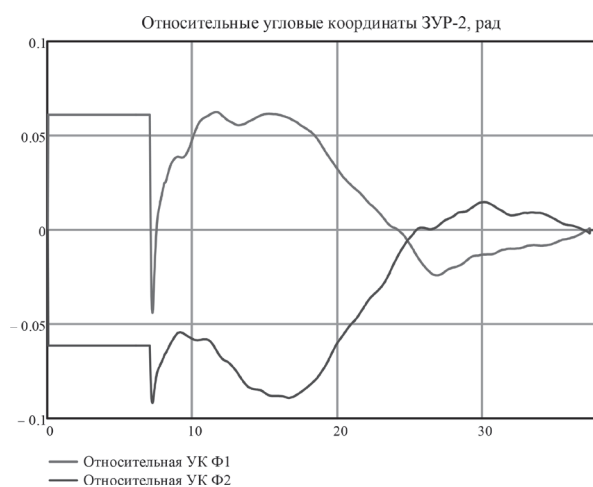


Рис. 27. Относительные координаты ракеты при наведении методом МПСТ (траектория 4)

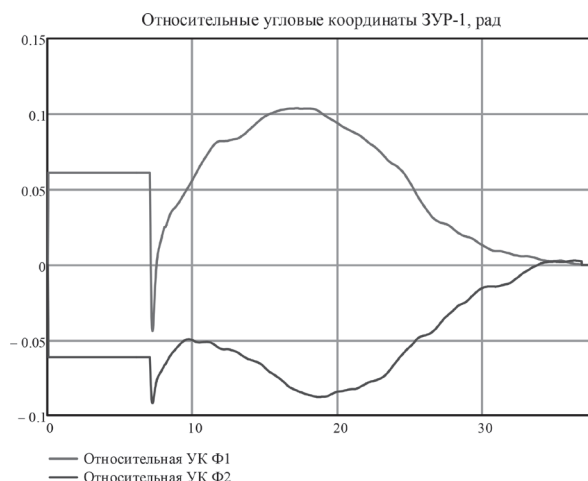


Рис. 24. Относительные координаты ракеты при наведении методом ММПН (траектория 4)

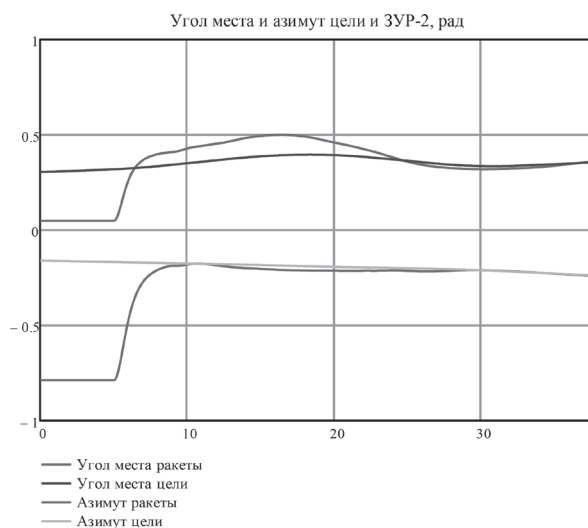


Рис. 26. Сферические координаты ракеты и цели при наведении методом МПСТ (траектория 4)



Рис. 28. Ускорения ракеты в СКСК при наведении методом МПСТ (траектория 4)

Альтернативная форма записи выражения для текущего промаха (пролета) имеет вид [4, 5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_\gamma &= \mathbf{h}_0 + \dot{\mathbf{h}}_0 \tau_y, \Delta \mathbf{a}_0 = \frac{\Delta \mathbf{a}}{\|\Delta \mathbf{a}\|}, \Delta \mathbf{v}_0 = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\|\Delta \mathbf{v}\|}, \\ \mathbf{h}_0 &= (\Delta \mathbf{r} - \Delta \mathbf{v}_0 (\Delta \mathbf{r} \Delta \mathbf{v}_0)), \\ \dot{\mathbf{h}}_0 &= -(\Delta \mathbf{a}_0 (\Delta \mathbf{r} \Delta \mathbf{v}_0) + \Delta \mathbf{v}_0 (\Delta \mathbf{r} \Delta \mathbf{a}_0)). \end{aligned} \quad (37)$$

Линейная ошибка наведения $\mathbf{h}_\zeta = (0 \ h_y \ h_z)^T$ оценивалась в момент равенства дальностей цели и ракеты согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned} \Phi &= 0.707((\Delta \varepsilon + \Delta \beta \cos(\varepsilon_2))(\Delta \beta \cos(\varepsilon_2) - \Delta \varepsilon))^T \\ \mathbf{h}_\zeta (\Delta r = 0) &= r_1 (\Delta \varepsilon \ \Delta \beta)^T, \\ \mathbf{h}_\varphi (\Delta r = 0) &= r_1 (\Phi_1 \ \Phi_2)^T, \Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \Delta \beta = \beta_1 - \beta_2, \end{aligned} \quad (38)$$

где Δr – разность радиальных дальностей цели и ракеты; $\mathbf{h}_\varphi$ – двухкомпонентный вектор линейной ошибки наведения в СК, повернутой на 45° относительно продольной оси.

Нормальные ускорения ЗУР в момент встречи рассчитывались следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{W} &= [\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V}], \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}(\theta, \varphi) \frac{[\mathbf{v}_1 \times \mathbf{a}_1]}{\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1}, \\ \mathbf{v}_1 = \dot{\mathbf{r}}_1 &= (v_{x1} \ v_{y1} \ v_{z1})^T, \mathbf{a}_1 = \ddot{\mathbf{r}}_1 = (\dot{v}_{x1} \ \dot{v}_{y1} \ \dot{v}_{z1})^T, \end{aligned} \quad (39)$$

где $\mathbf{V} = (V_x \ 0 \ 0)^T$ – вектор скорости ЗУР в проекциях на оси СКСК; $\mathbf{M}(\theta, \varphi)$ – матрица связи ЗСК и СКСК, зависящая от скоростных углов тангажа и рыскания θ, φ ЗУР.

Сравнительный анализ результатов моделирования, приведенных в табл. 1, позволяет сделать следующие выводы:

– точность наведения ракеты на низколетящую цель для МПСТ и ММПН отличается незначительно (это связано с отсутствием учета влияния зеркальных отражения от земли); при росте интенсивности флуктуаций по каналу цели предпочтительно использовать ММПН, как менее чувствительный к ошибкам измерения на начальном и среднем участках траектории;

– для обстрела скоростной цели, летящей на больших высотах и предельном параметре, целесообразно использовать ММПН, который обеспечивает меньшее значение ошибки наведения при докритических углах упреждения

(из рис. 15 следует, что перехват цели на траектории 2 методом МПСТ в реальной ситуации невозможен, так как ЗУР выходит за пределы сектора сопровождения);

– для обстрела цели, находящейся на предельных дальностях и высоте, целесообразно использовать ММПН ввиду меньшего уровня флуктуационных перегрузок ракеты, обусловленных ошибками измерения УК цели;

– при наведении ракеты на маневрирующую цель и при отсутствии канала оценивания нормальных ускорений цели предпочтение следует отдавать МПСТ, как менее чувствительному к величине ускорения маневра и его продолжительности.

Заключение

1. В работе предложен модифицированный МПН, учитывающий ограничения на сектор сопровождения ЗУР, несовпадение измерительной и СвСК, а также влияние неконтролируемых возмущающих воздействия, разработанный с использованием эвристического подхода и инженерных принципов проектирования.

2. Сравнительный анализ существующих и вновь разработанных методов показывает перспективность использования ММПН для перехвата скоростных целей, а также целей, летящих на предельной дальности и высотах.

3. Снижение величины ошибок наведения при использовании ММПН обусловлено меньшим порядком астатизма контура наведения (структурой кинематического звена) и, как следствие, более медленным ростом интенсивности флуктуаций управляющего воздействия (УСВ вектора скорости ракеты) при увеличении ошибок измерений.

4. Направлением дальнейших исследований является учет пространственных кинематических связей относительного движения, введение управления ракеты по крену для повышения вероятности перехвата (поражения) цели, использование нелинейной фильтрации для оценивания координат и параметров движения, а также реализация эталонной модели ракеты, корректируемой по данным пространственно – распределенных измерителей координат ракеты, для устойчивого сопровождения при больших углах упреждения и на заключительном участке наведения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Newell H. E. Guided Missile Kinematics. – Naval Research Labs. USA. – 1945.
2. Кан, В. Л. О точных решениях уравнений пропорциональной навигации / В. Л. Кан, А. С. Кельзон – Изв. вузов. Матем., 1962, №1. – с. 50–56.
3. Пугачев, В. С. Системы управления и динамика полета ракет / В. С. Пугачев, И. Е. Казаков, Д. И. Гладков; под ред. В. С. Пугачева. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1965. – 615 с.
4. Кринецкий, Е. И. Системы самонаведения / Е. И. Кринецкий. – М.: Машиностроение, 1970. – 236 с.
5. Батков, А. М. Проектирование систем наведения / А. М. Батков, А. А. Горский, В. Ф. Левитин; под ред. Е. А. Федосова. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
6. Максимов, М. В. Радиоэлектронные системы самонаведения / М. В. Максимов, Г. И. Горгонов – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
7. Казаков, И. Е., Мишаков А. Ф. Авиационные управляемые ракеты. Ч.2. Системы управления и динамика наведения управляемых ракет и бомб / И. Е. Казаков, А. Ф. Мишаков; под ред. И. Е. Казакова. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1985. – 423 с.
8. Воронов, А. А. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов: в 2-х ч. / А. А. Воронов [и др.]; под ред. А. А. Воронова. – М.: Высшая школа, 1986. – Ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – 504 с.
9. Dohi, N. Modified proportional navigation for a missile with varying velocity - comparison with the optimal guidance. / N. Dohi, Y. Baba, H. Takano. – The proceeding of 24th international congress of the aeronautical sciences ICAS – 2004. – Yokohama, Japan. – 2004. V. 7, p. 207–215.
10. Palumbo, Neil F. Modern homing missile guidance theory and techniques. / Neil F. Palumbo, Ross A. Blauwkamp, Justin M. Lloyd. – Johns Hopkins APL Technical digest, USA. – 2010. V.29. No. 1, p. 42–59.
11. Маркевич, В. Э. Аналитический синтез метода наведения сверхзвукового беспилотного летательного аппарата на основе многомерной нелинейной динамической модели. / В. Э. Маркевич // Сб. науч. тр./ ОИПИ НАН Беларуси. – Информатика. – 2017. – №2 (54). – с. 93–112.
12. Колесников, А. А. Проектирование многокритериальных систем управления промышленными объектами. / А. А. Колесников, А. Г. Гельфгат. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 304 с.
13. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. Инварианты, оптимизация, синтез. / А. А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1994. – 344 с.
14. Эвристический алгоритм. [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Эвристический_алгоритм. – Дата доступа: 21.02.2018.
15. Лурье, А. И. Аналитическая механика. / А. И. Лурье. – М.: Госфизматлит, 1961. – 824 с.
16. Горбатенко С. А. Механика полета. Общие сведения. Уравнения движения: инженерный справочник. / С. А. Горбатенко [и др.]; под ред. С. А. Горбатенко. – М.: Машиностроение, 1969. – 420 с.
17. Кун, А. А. Основы построения зенитно – ракетных комплексов / А. А. Кун, В. Ф. Лукьянов, С. А. Шабан. – Минск: ВА РБ, 2001. – 327 с.
18. Эскизный проект ракеты В-601П системы 125. Книга 1. Определение характеристик ракеты. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Дата доступа: 11.01.2018
19. Эскизный проект зенитной управляемой ракеты В-601П. Книга 2. Динамика полёта и эффективность ракеты. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Дата доступа: 3.02.2018.
20. Исследование по расширению боевых возможностей комплекса С-125 по обстрелу скоростных целей, летящих скоростью более 560м/с". [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Дата доступа: 7.03.2018.
21. Отчёт по испытаниям комплекса С-125, доработанного для улучшения боевых характеристик при стрельбе по маневрирующим целям. Том 2. 1973. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Дата доступа: 7.03.2018.

REFERENCES

1. Newell H. E. Guided Missile Kinematics. – Naval Research Labs. USA. – 1945.
2. Kan, V. L. About exact solutions of the equations of proportional navigation / V. L. Kan, A. S. Kelzon – News of higher education institutions. Math, 1962, No. 1. – с. 50–56.
3. Pugachev, V. S. Control systems and dynamics of flight of missiles / V. S. Pugachev, I. E. Kazakov, D. I. Gladkov; under the editorship of V.S. Pugachev. – M.: HMIA of prof. N. E. Zhukovsky, 1965. – 615 pages.
4. Krinetsky, E. I. Systems of homing / E. I. Krinetsky. – M.: Mechanical engineering, 1970. – 236 pages.
5. Batkov, A. M. Design of systems of targeting / A. M. Batkov, A. A. Gorsky, V. F. Levitin; under the editorship of E. A. Fedosov. – M.: Mechanical engineering, 1975. – 296 pages.
6. Maximov, M. V. The radio-electronic systems of homing / M. V. Maximov, G. I. Gorgonov – M.: Radio and communication, 1982. – 304 pages.
7. Kazakov, I. E., Mishakov A. F. Aviation guided missiles. Ch.2. Control systems and dynamics of targeting of guided missiles and bombs / I. E. Kazakov, A. F. Mishakov; under the editorship of I.E. Kazakov. – M.: VVIA of prof. N. E. of Zhukovsky, 1985. – 423 pages.

8. **Ravens, A. A.** Theory of automatic control: the textbook for HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS: in 2 h / A. A. Voronov [etc.]; under the editorship of A. A. Voronov. – M.: The higher school, 1986. – Ch.2. Theory of nonlinear and special systems of automatic control. – 504 pages.
9. **Dohi, N.** Modified proportional navigation for a missile with varying velocity – comparison with the optimal guidance. / N. Dohi, Y. Baba, H. Takano. – The proceeding of 24th international congress of the aeronautical sciences ICAS – 2004. – Yokohama, Japan. – 2004. V.7, p.207–215.
10. **Palumbo, Neil F.** Modern homing missile guidance theory and techniques. / Neil F. Palumbo, Ross A. Blauwkamp, Justin M. Lloyd. – Johns Hopkins APL Technical digest, USA. – 2010. V.29. No.1, p.42-59.
11. **Markevich, V. E.** Analytical synthesis of a method of guidance of the supersonic unmanned aerial vehicle on the basis of multidimensional nonlinear dynamic model. / V. E. Markevich // Sb. науч. тр. / OIPI NAN of Belarus. – Informatics. – 2017. – No. 2 (54). – page 93–112.
12. **Kolesnikov, A. A.** Design of multicriteria control systems of industrial facilities. / A. A. Kolesnikov, A. G. Gelfgat. – M.: Energoatomizdat, 1993. – 304 pages.
13. **Kolesnikov A. A.** Synergetic theory of control. Invariants, optimization, synthesis. / A. A. Kolesnikov. – M.: Energoatomizdat, Taganrog: TRTU publishing house, 1994. – 344 pages.
14. **Heuristic algorithm.** [Electronic resource]. – 2014. – Access mode: https://ru.wikipedia.org/wiki/Evrysticheskiy_algoritm. – Date of access: 21.02.2018.
15. **Lurye, A. I.** Analiticheskaya of the mechanic. / A. I. Lurye. – M.: Gosfizmatlit, 1961. – 824 pages.
16. **Gorbatenko S. A.** Mechanics of flight. General information. Equations of the movement: engineering reference book. / S. A. Gorbatenko [etc.]; under the editorship of S. A. Gorbatenko. – M.: Mechanical engineering, 1969. – 420 pages.
17. **Kuhn, A. A.** The basic of designed anti – aircraft guided missile / A. A. Kuhn, V. F. Lukyanov, S. A. Shaban. – Minsk: Military Academy the Republic of Belarus, 2001. – 327 pages.
18. **Outline sketch of the V – 601P ant – aircraft missile of system S – 125.** Book 1. Definition of characteristics of a missile. [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Date of access: 1/11/2018
19. **Outline sketch of an anti – aircraft guided missile V - 601P.** Book 2. Dynamics of flight and efficiency of a missile. [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Date of access: 2/3/2018.
20. **A research on expansion of fighting opportunities of the S-125 complex on firing of the high-speed purposes flying speed more 560 m/s".** [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Date of access: 3/7/2018.
21. **The report on tests of the S – 125 complex finished for improvement of fighting characteristics when firing at the maneuvering targets.** Volume 2. 1973. [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <http://www.historykpvo-2.ucoz.ru>. – Date of access: 3/7/2018.

Поступила
02.04.2018

После доработки
25.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

MODIFIED METHOD OF PROPORTIONAL NAVIGATION TO INTERCEPT AEROBALLISTIC TARGETS WITH A LIMITED SECTOR GUIDANCE OF MISSILE

The improved version of the algorithm realizing a method of proportional navigation for guidance of anti-aircraft guided missiles in the limited sector of the angular tracking connected with the line of sight of the aero ballistic target and the anticipations providing sustainable missile guidance with the maximum the angles of pre-emption, which aren't exceeding maximum permissible is considered. The analytical expressions describing the algorithm of calculation of guidance command and signals of correction, adaptive to parameters of the movement and realizing steady tracking and control of a guided anti-aircraft missile in the wide the ranges of the radial distance, heights and speeds of the movement of aerodynamic target are given. Results of mathematical simulation of a problem of spatial interception of the aero-ballistic targets and also the comparative analysis and preliminary estimate of accuracy of guidance of the existing classical and modified versions of a method of proportional navigation are presented.

Keywords: modified method of proportional navigation, guidance station missiles, anti-aircraft guided missile, the angular sector tracking, aeroballistics maneuvering target, a spatial model of the missile, the pointing errors.



Маркевич Виталий Эдмундович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, г. Минск, пр-т Независимости, д.95/7, к.16, e-mail: mark.vit@tut.by. Мобильные телефоны для связи (персональный): +375 (29) 169-69-70, +375 (29) 508-01-73.

Markevich Vitaliy Edmundovich – Candidate of Engineering Sciences, leader scientist, OJSC “ALEVKURP”. E-mail: mark.vit@tut.by.



Легкоступ Виктор Валерьевич – аспирант БГУИР, младший научный сотрудник ОАО “АЛЕВКУРП”, г. Минск, пр-т Независимости, д.95/7, к. 16. e-mail: legkostupvv@gmail.com

Legkostup Victor Valeryevich - post-graduate student of BSUIR, junior researcher, OJSC “ALEVKURP”.

E-mail: legkostupvv@gmail.com

Мобильные телефоны для связи (персональный): +375 (33) 682 43 02

Городские телефоны для связи (общие):

+375 (17) 280-91-67, +375 (17) 280-48-27, +375 (17) 281-78-26.

УДК 65.011.56: 378.1

A.V. PUZANOV

TRANSDISCIPLINARY MODELS OF HYDRAULIC DRIVES OF MOBILE MACHINERY

JSC «Special Design Bureau of Instrument Making and Automation»

Modern drive engineering requires a comprehensive analysis of all work processes in hydraulic drives, solving the problems of modeling the technological processes of their production using mathematical and software tools of various physicality.

The article proposes an approach to the development of hydrodrives of mobile equipment based on transdisciplinary models of instruments and control systems. These models are designed to unite in a single information space a methodical and mathematical apparatus of various physicality: mechanics, kinematic, hydromechanics, heat engineering, and methods for their solution. These measures will increase their adequacy, reduce assumptions and reduce the safety factor as a measure of imperfection of the scientific and technical understanding of the facility.

The article gives an example of the use of this approach in the development of volumetric hydraulic drives of mobile equipment - a technique for calculating the indicator diagram of an axial-plunger hydraulic machine at a micro level using the Matlab / Simulink, Autodesk Simulation CFD and Autodesk Simulation Mechanical software complexes. The indicator diagram of the hydraulic machine is a clear characteristic of the dynamic qualities of the product. From the correctness of the calculation of this characteristic, the dynamic properties, reliability and resource of the drive as a whole depend.

Keywords: *transdisciplinarity; multiphysical analysis; CAD; CAE.*

The creation of new generations of hydraulic drives requires an increase in the scientific and technical level of design and production. Increasing the technical and operational characteristics of hydraulic drives dictate the need to implement new development principles with a deeper theoretical analysis of its operating principles.

The actual direction of development of modern production is based on multidisciplinary, multi-level and multistage research based on inter-, multi- and transdisciplinary computer technology [1].

Transdisciplinarity – a way to expand the scientific worldview, which consists in the consideration of a phenomenon outside the framework of any single scientific discipline. In this context, transdisciplinarity is treated as a meta-methodology, since it accepts as the object different methods of different disciplines for their transformation [2].

In relation to the development of the hydraulic actuators are realized by two main approaches: modeling at the macro and microlevel.

At the macrolevel, will use the discretization of space on a functional basis, which leads to the representation of models at this level in the form of systems of ordinary differential equations. In

these equations the independent variable is time and the dependent variables constitute the vector of phase variables characterizing the state of the integrated elements of the sampled space. Such variables are force and velocity in mechanical systems, the voltage and current in electrical systems, pressure and flow of liquid and gas in hydraulic and pneumatic systems, etc. The system of ordinary differential equations are universal models at the macrolevel that is appropriate for analyzing both dynamic and steady-state objects.

Feature modeling at the microlevel is a reflection of the physical processes occurring in continuous space and time. The models at the microlevel are differential equations in partial derivatives. They independent variables are the spatial coordinates and time. Using these equations, mechanical stresses and deformations, pressure and temperature, etc.

Modeling at the microlevel problems of heat conduction and stress-strain state of the products is implemented through the finite element analysis for. For modeling of problems of dynamics of liquid and gas, fluid mechanics and heat and mass transfer uses finite-difference and finite-volume solution methods.

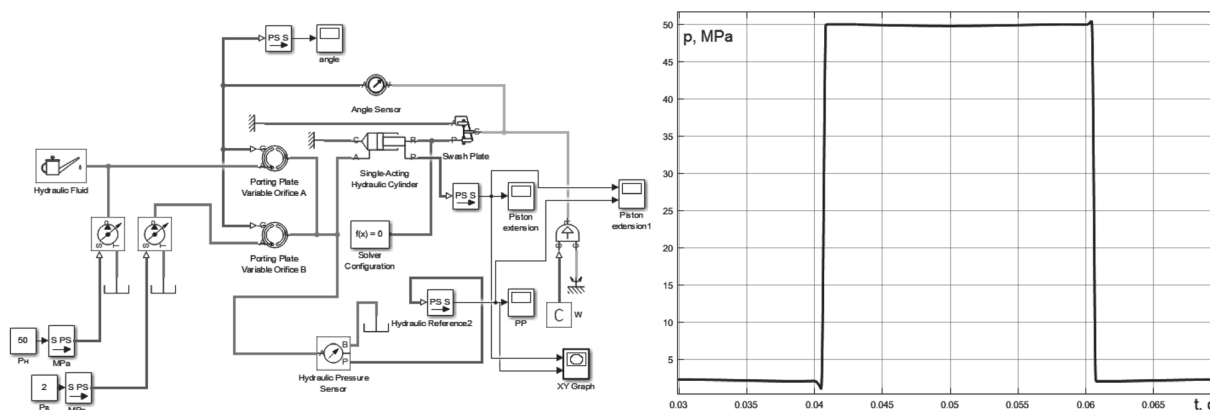


Figure 1. Model and result of calculating the indicator diagram of the hydraulic machine

To ensure the concept of the product life cycle model of the hydraulic actuators should reflect not only current status but also the changes in process operation and design (climatic) performance.

Thus, for a comprehensive analysis of all work processes in hydraulic drives, as well as solving problems of modeling technological and production processes, it is necessary to perform an analysis of problems of different physicality by various mathematical and software tools. The author proposes the development and use of transdisciplinary models of hydraulic drive and its elements. These models are designed to unite in a single information space a mathematical apparatus of a different physical nature: mechanics, kinematics, hydromechanics, heat engineering, levels and methods of solution. These models will reduce assumptions and reduce the safety factor as a measure of the imperfection of the scientific and technical understanding of the facility.

Structural elaboration of the product is carried out on schematic level. At this stage, actively apply software tools for simulation and analysis of circuit decisions on the macrolevel (Matlab/Simulink or other similar, for example, SciLab/SciCos). These programs reflect the characteristics of the whole system and use the description of the test facility and get the results in a familiar user graph form.

As an example of the macrolevel-model, in figure 1 present the model and result of calculation of the indicator diagram of the hydraulic machine.

The indicator chart shows the pressure change in the cylinder during the movement of the piston from the suction cavity – into the injection cavity and back. This dependence is a clear characteris-

tic of the dynamic qualities of the product. From the correctness of the calculation of this characteristic, the dynamic properties, reliability and resource of the drive as a whole depend. The kinematics and hydromechanics of the hydraulic machine, the properties of the working fluid and the performance characteristics are used as model parameters.

The macromodels is usually performed optimization of the system as a whole, traced the mutual influence of system components.

The disadvantages of macrolevel models are inherent in analytical and imitative approaches.

The next stage in the development of the product is a detailed study of its mechanisms and components. The initial data for this stage are the results of modeling at the macrolevel. The range of problems solved: kinematics, strength, fluid dynamics, electromagnetism, heat-mass transfer, etc., as well as their combination.

The task of calculating the indicator diagram at the microlevel, taking into account the geometric features and properties of materials, is solved by means of a complex of programs, including the tools CAD, CFD and CAE.

Adaptive CAD model is required to generate the original geometry and its changes based on simulation results, as well as for subsequent CAM preparation and production [3].

As a result of CFD modeling, the following results were obtained. Figures 2...4 show the distribution of pressure of the working fluid along the channels and gaps of the running part of the hydraulic machine with the flow velocity vectors, as well as the stresses in the structural elements of the running gear of the hydraulic machine caused by the action of the liquid, the mechanical part and the temperature effects.

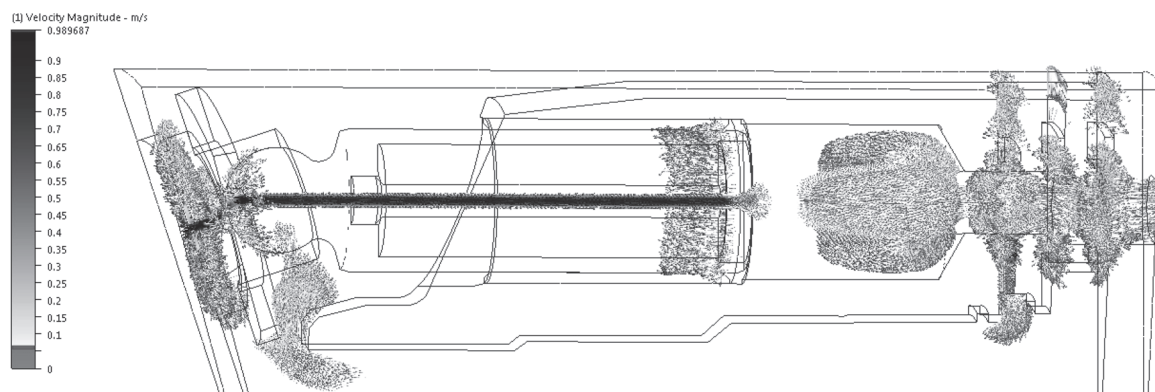


Figure 2. Vector field of flow rates of working fluid in the channels and gaps of the undercarriage of the hydraulic machine

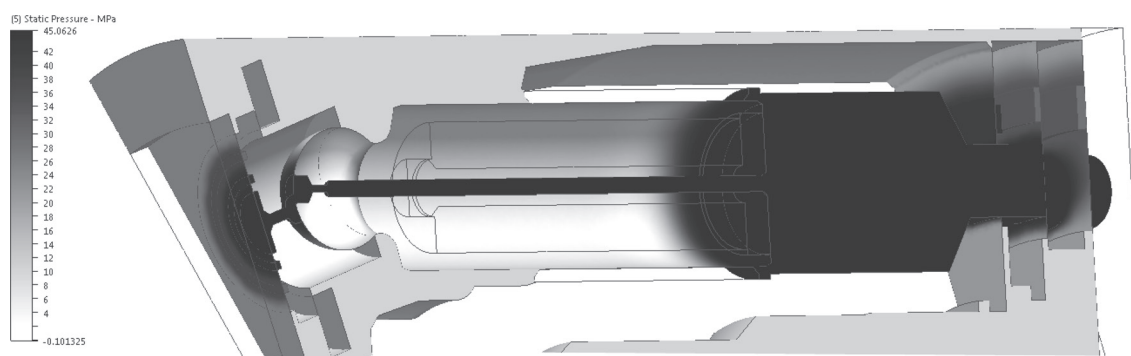


Figure 3. Field of working fluid pressure in the cavities and channels of the hydraulic machine

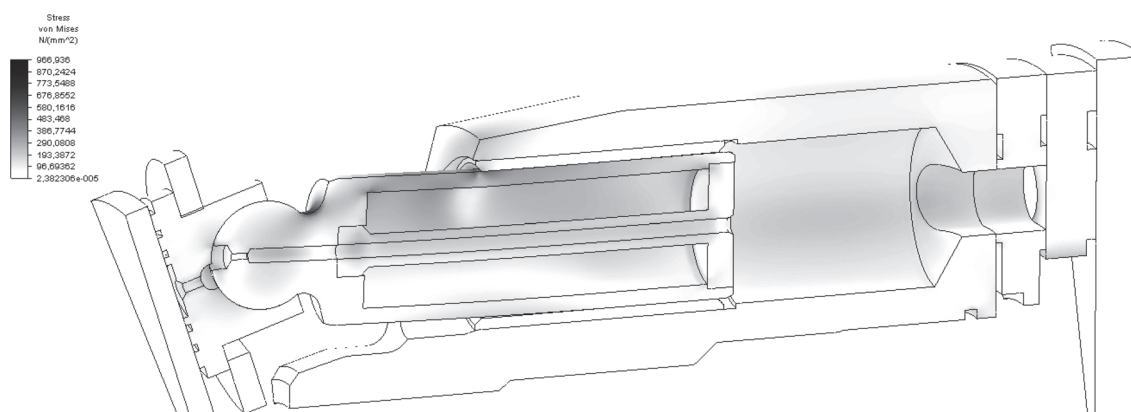


Figure 4 - Stresses of structural elements of the undercarriage of the hydraulic machine from the hydro-mechanical action of the working fluid

Based on the generalization of the results presented in figures 2...4, we obtain the graph of the indicator diagram (figure 5) of one of the variants of the design of the distribution node (as an example of the effect of design features on the form of the graph) [4].

The figure reflects the effect of micro-level parameters-the design features and properties of the working fluid, its gas saturation and pollution.

On the graph of the indicator diagram, positive results of the design work of the distribution center are seen: the smoothness of the line of entry into the zone of injection.

The oscillatory process at the beginning of the injection zone reflects the content of dissolved gas in the working fluid and the self-stabilization of the hydrostatic support of the plunger.

Analysis of the results presented in Figure 5 shows that the pressure drop and the transient process have a negative impact on the dynamics of the hydraulic drive, especially for mobile equipment.

Conclusion

The transdisciplinary approach allows for a limited number of objects to conduct their compre-

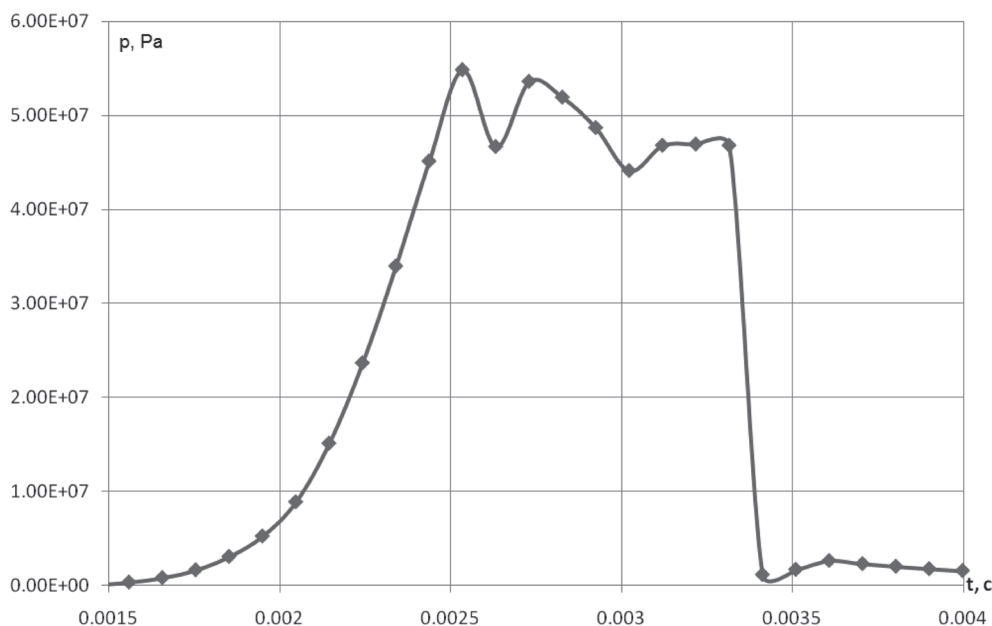


Figure 5. Indicator diagram of the axial-plunger hydraulic machine

hensive analysis, to study the properties of the target object more deeply and in detail, and to explore the mutual influence of the system and design parameters of the product and the parameters of the external environment.

The proposed approach to the development of hydraulic drives of mobile equipment allows to increase the adequacy of design models, reduce assumptions and increase the reliability of both hydraulic drive and mobile equipment.

REFERENCES

1. *Sovremennoe inzhenernoe obrazovanie : ucheb. posobie* / A. I. Borovkov [i dr.]. – SPb. : Izd-vo Politehn. U, 2012. – 80 p.
2. **Transdisciplinarity:** Stimulating Synergies, Integrating Knowledge Division of Philosophy and Ethics UNESCO, 1998, pp. 37–38.
3. **Puzanov, A. V.** Metodika formirovaniya CAE-modelej na primere konstruktorsko-tehnologicheskoy prorabotki plunzhera forsirovannoy gidromashiny / A.V. Puzanov // *Informatika* – 2017, № 2, pp. 37–44.
4. **Puzanov, A. V.** Modelirovanie indikatornoj diagrammy aksial'no-plunzhernoy gidromashiny / A. V. Puzanov, E. A. Ershov // *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017, № 3 (56), pp. 29–35.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современное инженерное образование : учеб. пособие** / А. И. Боровков [и др.]. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 80 с.
2. **Transdisciplinarity:** Stimulating Synergies, Integrating Knowledge Division of Philosophy and Ethics UNESCO, 1998, pp. 37–38.
3. **Пузанов, А. В.** Методика формирования САЕ-моделей на примере конструкторско-технологической проработки плунжера форсированной гидромашины / А. В. Пузанов // *Информатика* – 2017, № 2. – С. 37–44.
4. **Пузанов, А. В.** Моделирование индикаторной диаграммы аксиально-плунжерной гидромашины / А. В. Пузанов, Е. А. Ершов // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2017, № 3 (56). – С. 29–35.

Поступила
22.03.2018

После доработки
06.06.2018

Принята к печати
30.11.2018

Пузанов А.В.

ТРАНСДИСЦИПЛИНАРНЫЕ МОДЕЛИ ГИДРОПРИВОДОВ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Современное приводостроение требует проведения комплексного анализа всех рабочих процессов в гидроприводах, решения задач моделирования технологических процессов их производства с использованием математических и программных средств различной физической природы.

В статье предложен подход к разработке гидроприводов мобильной техники на основе трансдисциплинарных моделей приборов и систем управления. Эти модели призваны объединить в едином информационном пространстве методический и математический аппарат различной физической природы: механику, кинематику, гидромеханику, теплотехнику, а также методы их решения. Эти мероприятия позволят увеличить их адекватность, сократить допущения и снизить коэффициент запаса как меру несовершенства научно-технического представления об объекте.

Увеличение мощности гидроприводов определяет повышение точности методик расчета при проектировании их элементов и систем на их основе. Наглядной характеристикой динамических качеств изделия является индикаторная диаграмма гидромашины. От корректности расчета этой характеристики зависят динамические свойства, надежность и ресурс привода в целом.

В статье приведен пример использования данного подхода при разработке объемных гидроприводов мобильной техники – методика расчета индикаторной диаграммы аксиально-плунжерной гидромашины на микроуровне с использованием программных комплексов Matlab / Simulink, Autodesk Simulation CFD и Autodesk Simulation Mechanical.

Представлены результаты моделирования индикаторной диаграммы гидромашины на макро- и микроуровнях, в том числе поле давления и векторов скорости потока рабочей жидкости в каналах проточной части гидромашины и напряжения в конструкции элементов ходовой части гидромашины. Выполнена верификация результатов моделирования макро- и микромоделей.

Ключевые слова: трансдисциплинарность; мультидисциплинарный анализ; CAD; CAE.



Пузанов Андрей Викторович, к.т.н.

Помощник Генерального директора по науке ОАО «Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматики».

601919, Россия, Владимирская обл., г. Ковров, ул. Крупской, 55.

Телефон рабочий: (49232) 9-37-84

avp@oao-skbpa.ru

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

УДК 629.113.073

В. Г. МИХАЙЛОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ S-FUNCTION BUILDER В MATLAB/SIMULINK

Проведен анализ используемых методов задания внешнего возмущения в MATLAB/SIMULINK с помощью генератора белого шума и последующей фильтрации и задания по точкам в MS.Excel (1000 значений). Установлено, что они не обеспечивают решения задач, требующих больших объемов данных и необходимого быстродействия и не могут применяться для более сложных задач (моделирования движения и нагруженности автомобиля, задания траекторий полета, проходческого оборудования и других). Существующие подходы и приемы могут использоваться только для решения несложных задач. Отмечено, что большинство исследователей не используют модуль S-FUNCTION BUILDER из-за непонимания его настройки и владения языком C/C++. Выявлены проблемы с компиляцией программ в модуле S-FUNCTION BUILDER. Предлагаемые на форумах решения их устранения не удобны на практике. Предложено решение этой проблемы через установку системной переменной Windows.

Предложен подход и прием задания внешнего возмущения с помощью модуля S-FUNCTION BUILDER, позволяющий решить эти проблемы.

Подробно рассмотрены настройка и использование модуля S-FUNCTION BUILDER для формирования внешнего возмущения для этих задач,

Предложена программа реализации задания внешнего возмущения на языке C/C++, приведен исходный текст программы.

Показана блок-схема использования модуля S-FUNCTION для решения совместного моделирования движения и нагруженности автомобиля.

Рассмотрены области применения предложенной программы и подхода для исследований мехатронных систем.

Предложенный подход и прием задания внешнего возмущения с помощью модуля S-FUNCTION BUILDER позволяет решать сложные задачи и перейти к более сложному имитационному моделированию с участием человека.

Ключевые слова: Моделирование в MATLAB/SIMULINK, модуль S-FUNCTION BUILDER, его настройка и программирование на языке C/C++.

Введение

Сейчас при разработке и доводке многих конструкций (транспортного средства (ТС), самолета, машины, станка) все чаще прибегают к методам виртуального моделирования. Использование этих методов оправдано, когда обеспечивается хорошая точность расчетов, зависящая от корректности модели и задания внешнего возмущения. Особенно это важно для отладки систем управления различными объектами и решения задач имитационного моделирования, которые должны выполняться в реальном масштабе времени и для этого должны задаваться внешние возмущения, например макро и микропрофиль дорог для транспортных средств [1–3, 4, 7–10, 12, 13].

Наиболее часто для моделирования используют пакет MATLAB/SIMULINK, который

позволяет решать нестандартные ситуации, связанные с логикой условий и заданием внешнего возмущения. К сожалению, большинство исследователей для них используют стандартные логические интерпретируемые компоненты MATLAB, снижающие быстродействие Simulink. А в качестве внешнего возмущения применяется сигнал с генератора белого шума, пропущенный через фильтры. Последнее не всегда отражает реальную картину возмущения. Поэтому предпринимаются попытки задать возмущение по точкам реальных замеров с последующей интерпретацией промежуточных значений. В Simulink имеется возможность задать возмущение через массив MS.Excel с использованием интерпретируемых функций MATLAB. Недостатком такого подхода является ограниченный объем массива (1000 значе-

ний), невозможность его подкачки и недостаточное быстроедействие. Тем не менее в ряде случаев такой подход вполне может использоваться, например, моделирование движения автомобиля по реальной дороге на небольших участках [5, 6]. В тоже время он не применим для задач, требующих задания больших массивов данных. Например, моделирование нагрузки автомобиля [12], траектории полета крылатой ракеты, БЛА по сложно пересеченной местности и больших расстояний или проходческого оборудования метро. В тоже время в пакете MATLAB/SIMULINK имеется модуль S-FUNCTION BUILDER, который позволяет решать эти задачи. В технической литературе его применение крайне плохо описано из-за чего многие его не используют. Второй причиной его неиспользования является непонимание его настройки и невладение языком C/C++. Модуль S-FUNCTION BUILDER позволяет реализовать пользовательскую программу на языке C/C++ в виде своеобразной DLL. Что получить эту DLL необходимо подключить компилятор на языке C/C++ и интегрировать его в MATLAB/SIMULINK. Имеется проблема с компиляцией программы на языке C/C++, начиная с версии R2015b. Для решения ее на форуме предлагается в основном меню каждый раз после загрузки MATLAB выполнить команду `setenv('MW_MINGW64_LOC', 'C:\TDM-GCC-64')`, что несколько неудобно. Второй сложной проблемой является повторная загрузка данных на каждом цикле операции и подкачка нового блока информации. И пока не предложено их решение.

Начиная с версии R2017b в MATLAB/SIMULINK появилась библиотека для работы с микроконтроллерами Arduino/Raspberry, которая позволяет через их АЦП и ЦАП получать информацию с датчиков исследуемого объекта и управлять работой станков. Это в сочетании с моделированием самого объекта на MATLAB/SIMULINK дает возможность реализовать имитационное моделирование более приближенное к реальному. Поэтому использование более корректных моделей, нового подхода и приема по формированию внешнего возмущения через модуль S-FUNCTION BUILDER и решение отмеченных проблем представляется актуальной задачей, играющей ключевую роль в переходе к сложному имита-

ционному моделированию с участием человека.

Настройка модуля S-FUNCTION BUILDER

Для его использования вначале требуется скачать из интернета файл компилятора `tdm64-gcc-5.1.0-2.exe` (64-х битный) или версии выше и разместить его в папке `C:\TDM-GCC-64`.

Затем в главном меню MATLAB выполнить команду `uiopen('C:\TDM-GCC-64\tdm64-gcc-5.1.0-2.exe', 1)`. При появлении открывшегося окна рекомендуется убрать галочку слева внизу страницы. После его установки перейти в Windows **компьютер_система_переменные среды**. Создать и установить системную переменную `MW_MINGW64_LOC` равную `C:\TDM-GCC-64`. После перезагрузить компьютер. В результате MATLAB/SIMULINK может компилировать напрямую программу, устранив имевшую проблему.

Снова загружаем MATLAB и устанавливаем путь на папку с программой SIMULINK и запускаем сам Simulink Library. На окно с программой переносим модуль S-FUNCTION BUILDER. Дважды быстро нажав на него, начинаем его настраивать. В первую очередь дадим имя S-function name, например `MPD` (рис. 1). Рекомендуется давать программе Simulink *.slx имя отличное от S-function name.

В подменю Data Properties задаем входные и выходные параметры/переменные. Нажимаем Save и модуль S-FUNCTION BUILDER создает пустой шаблон программы `mpd.c`. В эту программу/необходимо внести свои переменные и сам реализующий текст на языке C/C++ и сохранить ее. Фрагмент вносимой программы и места их расположения приведены ниже.

```
/*
 * File: MPD.c
 */
//После
#include «simstruc.h»
// вставляем свои библиотеки и переменные
// Блок своих библиотек и переменных
#include <stdio.h>
#include <math.h>

float rd[384000];
```

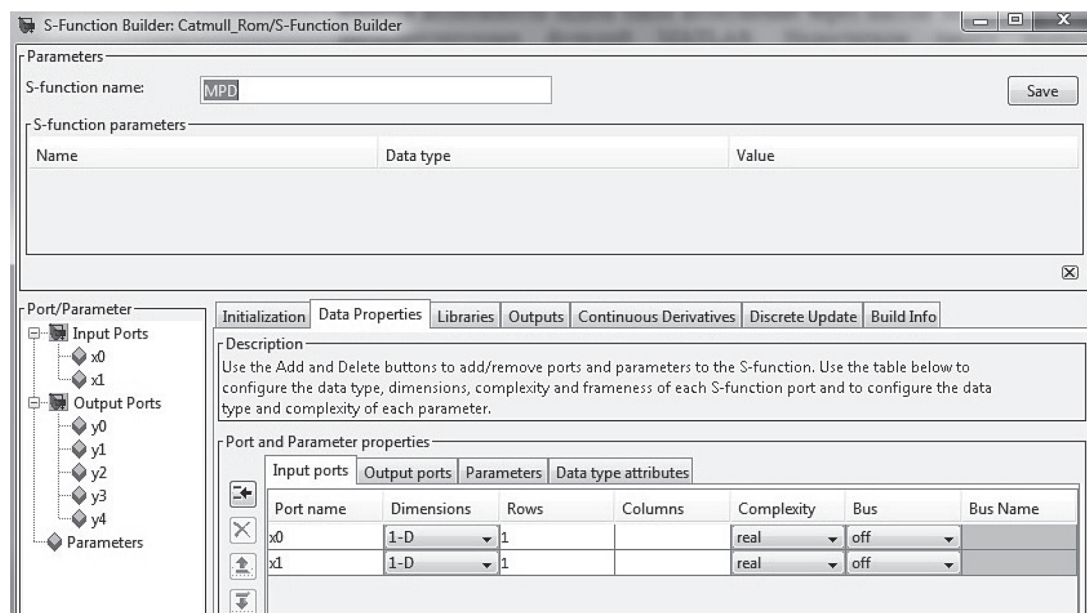


Рис. 1 Меню модуль S-FUNCTION BUILDER

```

long ch=0;
long nbl=0;

/*=====
 * S-function methods *
 *=====*/

//После
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
// записываем свой текст программ

double x, x_2, x_3, sx, y_0, y_1, y_2, ts, N, h;
double yn, kr1, Va, ma, Ndv, ndvs, Fk, Fv, Fy,
jm, a2, kz, m_d, p_u, a, b, c, P0, P1, P2, P3, u, t, t2, t3;
FILE *fp1;

long n, i;
float an;
// Переменные const real_T *x0.. real_T *y0 =
(real_T *)ssGetOutputPortRealSignal(S,0); это
переменные генерируемые самим модулем
S-FUNCTION BUILDER.

```

```

const real_T *x0 = (const real_T*) ssGetInput-
PortSignal(S,0);
const real_T *x1 = (const real_T*) ssGetInput-
PortSignal(S,1);
real_T *y0 = (real_T *)ssGetOutputPortRealSig-
nal(S,0);
real_T *y1 = (real_T *)ssGetOutputPortRealSig-
nal(S,1);
real_T *y2 = (real_T *)ssGetOutputPortRealSig-
nal(S,2);

```

```

real_T *y3 = (real_T *)ssGetOutputPortRealSig-
nal(S,3);
real_T *y4 = (real_T *)ssGetOutputPortRealSig-
nal(S,4);

```

```

// определяю значение для точки X1
// Микропрофиль правая колея переднее колесо

```

```

if (ch==0)
{
sx=384000*nbl;
fp1=fopen("rd.bt","rb");
fseek(fp1, sx, SEEK_SET);
for (i=0; i<96000; i++)
{
fread(&an, 4, 1, fp1);
rd[i]=an;
} //for
ch=1;
fclose(fp1);
}

```

```

// определеи значение для точки X1
ts=0.125;
x = x0[0]-(11892*nbl);
if (x<0.0)
x=0.0;
n=u=x/ts;
t=u-n;
//t=fabs(u- n);
t2=t*t;
t3=t*t*t;

```

```
// Интерполирование значений промежуточ-
ных точек методом Catmull_Rom
P0=rd[n-1];
P1=rd[n];
P2=rd[n+1];
P3=rd[n+2];

*y0=0.5* ((2*P1) +(-P0 + P2) * t +(2*P0 - 5*P1
+ 4*P2 - P3) *t2 +(-P0 + 3*P1- 3*P2 + P3) *t3);
//-----
h=(x-11992.0)*(nbl+1.0);
if (h>=0.0)
{
ch=0;
//j=0;
nbl++;
}
if (nbl==10)
ch=1;
//-----
} // Конец программы

/* Function: mdlTerminate
=====
* Abstract:
* In this function, you should perform any ac-
tions that are necessary
* at the termination of a simulation. For example,
if memory was
* allocated in mdlStart, this is the place to free it.
*/
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}
#ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being
compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface
mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h" /* Code generation registra-
tion function */
#endif
```

Реализация внешнего возмущения

Выбор размера массива для хранения дан-
ных float rd[384000]; определен эксперименталь-
но. Выяснено, что при значении более 392000
происходит сбой.

Чтобы исключить многократную загрузку
данных на каждом шаге вычисления использу-
ется счетчик if (ch==0) {}, в тело которого по-

мещается текст программы. И он отслеживает
переход на следующий блок загрузки.

Параметр 11892 зависит от шага записи дан-
ных. В данном случае массив сформирован
с шагом $ts = 0,125$ м, 160 Гц. Значение 11892
получается, как $96000/8 = 12000$. Значение 8
определяется как количество точек на метр
пути (1 м/0,125 м). Немного уменьшаем 12000
до 11892, чтобы не было переполнение масси-
ва 384000 байт (96000 записей).

Интерполирование значений промежуточ-
ных точек выполнено методом Catmull Rom, ко-
торый наиболее подходит для этих целей. Дру-
гие методы (Ньютона, квадратической интер-
поляции) показали более худшие результаты.

После того как откорректирована програм-
ма в главном меню MATLAB выполняем ко-
манду **mex mpd.c** и после сообщения об ее
успешной компиляции можно выполнять обыч-
ный процесс моделирования в Simulink.

Как видно из представленного материала
ничего сложного в применении S-FUNCTION
BUILDER нет и предложенный подход и при-
ем позволяет просто реализовать формирова-
ние внешнего возмущения. Кроме на этот мо-
дуль можно возложить еще логические опера-
ции, например, логику управления двигателем
и переключением передач КПП, как это реали-
зовано автором при проведении совместного
моделирования движения и нагруженности ав-
томобиля (рис. 2).

В данном варианте динамика движения ав-
томобиля по дороге описана следующими из-
вестными уравнениями [6–7]

$$\frac{dV_a}{dt} = \frac{F_k - F_{\text{ш}} - F}{m_a \delta}$$

где F_k – сила тяги

$$F_k = \frac{Mu_{\text{кп}} u_{\text{вм}} \eta_{\text{т}}}{r_{\text{к}}};$$

где M – текущий крутящих моментов двигателя
внутреннего сгорания (ДВС), Н·м, $\eta_{\text{т}}$ – КПД
трансмиссии на соответствующей передаче КПП;
 $r_{\text{к}}$ – радиус качения ведущих колес автомоби-
ля, м; $u_{\text{кп}}$ – текущее значение передаточного
числа КПП; $u_{\text{вм}}$ – передаточное число главной
передачи ведущего моста;

$F_{\text{в}}$ – сила сопротивления воздуха

$$F_{\text{в}} = K_{\text{в}} A_{\text{а}} v_{\text{а}}^2;$$

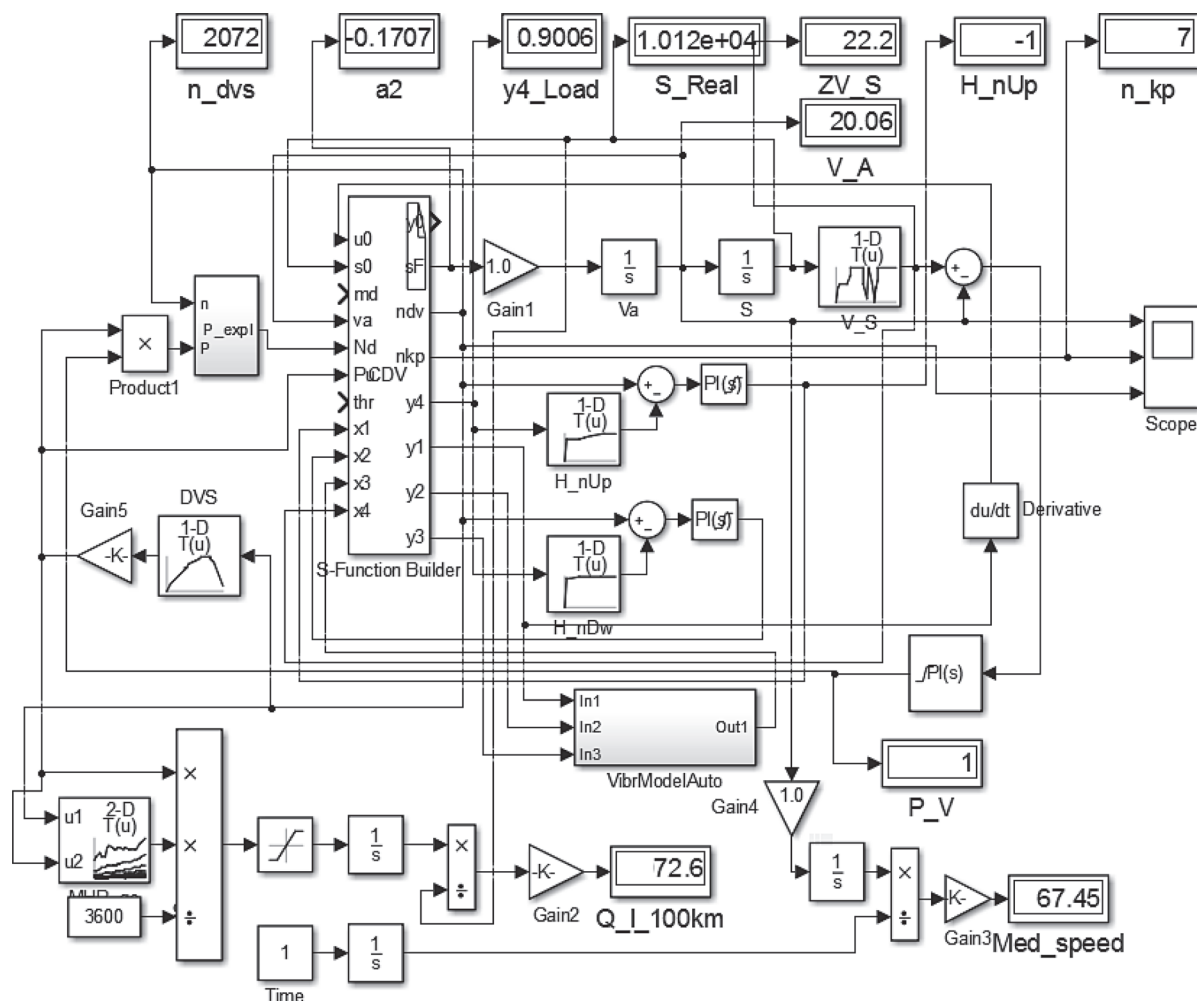


Рис. 2. Блок-схема совместного моделирования движения и нагруженности автомобиля

где K_b – коэффициент обтекаемости автомобиля, $\text{H} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$; A_a – лобовая площадь автомобиля, м^2 ; v_a – текущая скорость движения автомобиля, м/с ,

$$V_a = \frac{\pi}{30} \frac{nr_k}{u_{\text{кп}} u_{\text{вм}}},$$

где n – текущая частота вращения коленчатого вала ДВС, мин^{-1} ; F_ψ – сила дорожного сопротивления

$$F_\psi = 9,81 \psi m_a$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг ; ψ – коэффициент дорожного сопротивления,

$$\psi = f \cos \alpha + \sin \alpha$$

где α – угол наклона текущего элементарного участка маршрута, f – коэффициент сопротивления качению автомобиля как одной материальной точки,

где $f_{\text{ш}}$ – коэффициент сопротивления качению шин; F_j – сила сопротивления разгону.

$$F_j = m_a a \delta,$$

где a – ускорение автопоезда м/с^2 , δ – коэффициент учета вращающихся масс,

$$\delta = \frac{j_{\text{eng}} \eta_T (u_{\text{кп}} u_{\text{вм}})^2}{m_a r_k^2} + \frac{\sum J_k}{m_k r_k^2};$$

где J_{eng} – момент инерции вращающихся масс двигателя и сцепления, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, J_k – суммарный момент инерции колес автопоезда и приводных валов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Также использовались дополнительные массивы ограничения скорости (связанные с населенными пунктами, поворотами, препятствиями) и встречных и попутных автомобилей. Дополнительно в модель поступает информация о пробое подвески (x3), что вызывает снижение скорости на 10% на последующей длине участка (100 м). Управляющее скоростью воздействие осуществлялось с помощью PID-регулятора $\int PI(s)$ и множительного блока Pro-

duct1. Учитывались потери мощности на вентилятор, генератор, глушитель в модуле P_expl. Расход топлива рассчитывался с помощью характеристик двигателя и его загрузки.

Колебания автомобиля 6×6 с задней балансирной подвеской (VibrModelAuto) [12], определяющие его нагруженность, описаны на основе принципа Даламбера следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} m_a \ddot{Z}_o - (F_{п1} + F_{п2}) &= 0; \\ J_a \ddot{\phi}_1 + (F_{п1}L_1 - F_{п2}L_2) &= 0; \\ m_{н1} \ddot{Z}_{н1} + (F_{ш1} - F_{п1}/2) &= 0; \\ m_{н2} \ddot{Z}_{н2} + (F_{ш2} - F_{п2}/2) &= 0; \\ m_{н3} \ddot{Z}_{н3} + (F_{ш1} - F_{п2}/2) &= 0; \\ \phi_1 = \frac{Z_1 - Z_2}{2L_1 + 2L_2}; \quad \dot{\phi}_1 = \frac{\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2}{2b_{ш1} + 2b_{ш1}}; \\ F_{ш1} &= F_{сш1}(q_1) + F_{кш1}(\dot{q}_1); \\ F_{ш2} &= F_{сш2}(q_2) + F_{кш2}(\dot{q}_2); \\ F_{ш3} &= C_{ш3}(q_3) + F_{кш3}(\dot{q}_3); \\ F_{п1} &= F_{р1}(\phi(L_1 - L_2)) - F_{амп1}((L_1 - L_2)\dot{\phi}_1) + \\ &\quad F_{тр1}(\dot{Z}_{а1} - \dot{Z}_{н3}); \\ F_{п2} &= F_{р2}\left(\frac{\phi_1(L_2 - L_3)}{2}\right) + \\ &\quad F_{тр2}\left(\dot{\phi}_{а2}\dot{Z}_2 - \frac{(\dot{Z}_{н2} + \dot{Z}_{н3})}{2}\right); \end{aligned}$$

где $F_{сш1}$, $F_{сш2}$, $F_{сш3}$ – упругая характеристика шин переднего, среднего заднего моста в виде зависимости от относительной их деформации; $F_{р1}$, $F_{р2}$, – упругая характеристика рессор переднего моста и балансирной подвески в виде зависимости от их относительной деформации; $F_{тр1}$, $F_{тр2}$ – характеристика трения рессор переднего моста и балансирной подвески в виде зависимости интеграла от относительной скорости перемещения с ограничениями ее величины, подробно описанные в работе [12]; $F_{амп1}$ – характеристика амортизаторов переднего моста в виде зависимости от относительной скорости перемещения; $F_{п1}$, $F_{п2}$ – суммарная характеристика передней и задней подвески – сумма характеристик рессор, амортизатора и трения переднего моста и балансирной подвески; m_a – масса подрессоренной части автомобиля; $m_{н1}$, $m_{н2}$, $m_{н3}$ – неподдресоренная масса переднего, среднего, заднего моста; L_1 , L_2 , L_3 – расстояние

между центром тяжести и передней и задними осями подвески; $J_a = m_a r_{x1}^2$ – момент инерции подрессоренной массы в продольной плоскости; q_1 , q_2 , q_3 , $\dot{q}_1$, $\dot{q}_2$, $\dot{q}_3$ – текущая высота микронеровности и ее значение скорости под передний, средним и задним колесом.

При моделировании подвесок использовалась комбинированная модель трения [12] с упругими элементами и «вязкого» трения, которая более точно описывает динамическую характеристику рессорной подвески, сиденья и колебания при малых значениях возмущения и обеспечивает хорошую сходимость в октавных полосах частот (расхождение 5–15 %).

Следует отметить, что использование S-FUNCTION BUILDER при шаге интегрирования 0,001 и 16-ти интеграторах позволяет проводить моделирование в реальном масштабе времени (в полосе частот 0–25 Гц) при использовании компьютеров с процессорами с частотой около 4 Гц.

Вопрос получения внешнего возмущения представляет собой отдельную задачу. Макро и микропрофиль дорог можно получить путем замеров ускорений подрессоренных и неподдресоренных масс автомобиля с последующим их преобразованием в MATLAB/SIMULINK [11]. Сейчас в ТВ программе National Geographic промелькнул сюжет об возможном использовании для управления беспилотными автомобилями данных сканирования дорожного полотна на его глубину и создании их карт по типу навигационных.

Рассмотренный выше подход и прием использования S-FUNCTION BUILDER и предложенная модель может использоваться в различных областях, например, при:

- моделировании вибронгруженности рабочих мест ТС, операторов, вибраций различных машин и оборудования;
- вибрационной диагностики технических устройств, приборов, машин, мостов, железнодорожных путей и др;
- создании имитационных стендов и проведения на их базе различных исследований по оценке нагруженности узлов и систем и вопросов безопасности:
- управлении испытательными стендами;
- задании траекторий полета летательного объекта, туннеля на основе данных радарного сканирования земли [9].

- для задания дорожных условий при моделировании беспилотных автомобилей, роботов;
- управлении позиционированием (подъем и горизонтирование) платформ машин и их модулей;
- оценке качества дорог (микропрофиля).

Заключение

1. Как показал проведенный анализ используемые стандартные методы задания внешнего возмущения в MATLAB/SIMULINK не обеспечивают решения задач, требующих больших объемов данных и необходимого быстродействия.

2. Предложен подход и прием задания внешнего возмущения с помощью модуля S-FUNCTION BUILDER, позволяющий решить эту проблему.

3. Рассмотрено настройка и использование модуля S-FUNCTION BUILDER для формирования внешнего возмущения, приведена программа на языке C/C++.

4. Предложенный подход и прием задания внешнего возмущения с помощью модуля S-FUNCTION BUILDER позволяет решать сложные задачи и перейти к более сложному имитационному моделированию с участием человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Emanuele Obialero**. A Refined Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators // Chalmers University of Technology / Göteborg, Sweden 2013. Master's thesis, P. 120.
2. **Shakouri P.** A Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab // P. Shakouri A. Ordys M. Askari, D. S. Laila/ Faculty of Engineering, Kingston University, London, 07 May 2015.
3. **Solhmirzaei Ali**. Road profile estimation using wavelet neural network and 7-DOF vehicle dynamic systems/ Solhmirzaei Ali, Azadi, Shahram and Kazemi/ Journal of Mechanical Science and Technology 26 (10) (2012) 3029~3036.
4. **Skulic A.** and All Methods and devices for registration of road microprofiles. / [Электронный ресурс/ Electronic resource]. / <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0040-2176/2016/0040-21761605697S.pdf> – Режим доступа Access mode: 30.10.2017.
5. **Moustapha Doumiati, Alessandro Victorino**. Estimation of road profile for vehicle dynamics motion: experimental validation / [Электронный ресурс/ Electronic resource]. / https://www.researchgate.net/publication/224254316_Estimation_of_road_profile_for_vehicle_dynamics_motion_Experimental_validation 2011 American Control Conference on O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA June 29 – July 01, 2011.
6. **Выгонный, А. Г.** Закон переключения передач, оптимальный по тягово-скоростным и топливно-экономическим показателям магистрального автопоезда / А. Г. Выгонный, О. С. Руктешель, Р. Э. Шейбак // Актуальные вопросы машиностроения 2015, Т. 4, С. 182–188.
7. **Выгонный, А. Г.** Сравнительный анализ многокритериальной и однокритериальной оптимизации параметров двигателя и трансмиссии магистрального автопоезда / А. Г. Выгонный, М. М. Дечко, А. А. Дюжев, С. В. Харитончик // Механика машин, механизмов и материалов, 2014, № 4. С. 40–46.
8. **Карта** для определения высоты местности и профиля высот <http://22dx.ru/online/karta-vy-sot/> [Электронный ресурс]. / <http://www.vhfdx.ru/karta-vyisot/> – Режим доступа: 24.12.2017.
9. **Per Sahlholm** Piecewise Linear Road Grade Estimation / Per Sahlholm, Ather Gattami, Karl Henrik Johansson / Scania CV AB, 2 ACCESS Linnaeus Centre Royal Institute of Technology, Sweden, 2011. KTH - School of Electrical Engineering SE-100 44 Stockholm, Sweden TRITA-EE 2011:007. P.16.
10. **Per Sahlholm** Road Grade Estimation for Look-ahead Vehicle Control / Per Sahlholm _ Karl Henrik Johansson _ Scania CV AB, SE-151 87 Sodertalje, Sweden / _ Royal Institute of Technology (KTH), SE-100 44, Stockholm. P.7.
11. **Михайлов, В. Г.** Получение и использование единого массива продольного профиля и микропрофиля дороги для моделирования ТС // журнал автомобильных инженеров № 2, 2018, с. 4–7.
12. **Михайлов, В. Г.** Оценка эффективности систем поддрессирования грузового автомобиля / В. Г. Михайлов, Д. В. Мисута // Автомобильная промышленность – 2016, №5, С. 16–20.

REFERENCE

5. **Vigonny, A. G.** Law of a gear shift, optimum on on tjavovo-speed and fuel to economic indicators of the main lorry convoy / of A. G.Vygonny, O. S. Rukteshel, R. E. Shejbak // Pressing questions of mechanical engineering 2015. V. 4. С. 182–188.
6. **Vigonny, And.** The Comparative analysis многокритериальной and однокритериальной optimisation of parametres of the engine and transmission of the main lorry convoy / of A. G.Vygonny, M.M.Dechko, A. A. Djuzhev, S. V. Haritonchik// Mechanics of cars, gears and materials, 2014, № 4. With. 40–46.
9. **A chart** for definition of height of district and a cross-section of heights <<http://22dx.ru/online/karta-vy-sot/>> [the Electronic resource] / <http://www.vhfdx.ru/karta-vyisot/> – an access Mode: 12/24/2017.
9. **Михайлов, В. Г.** Reception and use of a uniform file of a longitudinal cross-section and microcross-section of road for vehcile modelling//magazine of automobile engineers № 2, 2018, P. 4–7.
10. **Mikhailov, V. G.** Estimation of vibration the staff car / V.G.Mihailov, D.V.Mishuta//the Collection of proceedings of Military academy of Byelorussia – 2016. – № 1. – P. 159-164.

12. **Mikhailov, V. G.** Otsenka of efficiency of systems of a cushioning of the cargo car/century G. Mihajlov, D. V. Mishuta // Motor industry – 2016, №5, С. 16–20.

Поступила
19.05.2018

После доработки
21.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

Vladimir Mikhailov

USE S-FUNCTION BUILDER IN MATLAB/SIMULINK

The analysis of used methods of the task of external indignation in MATLAB/SIMULINK by means of the generator of white noise and the subsequent filtration and the task on points in MS.Excel (1000 values) is carried out. It is established that they do not provide the decision of the problems demanding great volumes of the data and necessary speed and cannot will be applied to more challenges (modelling of movement and loading the vehicle, the task of trajectories of flight, проходческого the equipment and others). Existing approaches and receptions can be used only for the decision of simple problems. It is noticed that the majority of researchers do not use the module S-FUNCTION BUILDER because of misunderstanding of its adjustment and mastery of a language C/C++. Problems with compilation of programs in the module S-FUNCTION BUILDER ARE REVEALED. Decisions of their elimination offered at forums are not convenient in practice. The decision of this problem through installation of system variable Windows is offered.

The approach and reception of the task of external indignation by means of the module S-FUNCTION BUILDER IS OFFERED, allowing to solve these problems.

Adjustment and module use S-FUNCTION BUILDER for formation of external indignation for these problems are in detail considered,

The program of realisation of the task of external indignation in language C/C++ is offered, the initial text of the program is resulted.

The block diagramme of use of the module S-FUNCTION for the decision of joint modelling of movement and нагруженности the car is shown.

Scopes of the offered program and the approach for probes мехатронных systems are considered.

The offered approach and reception of the task of external indignation by means of the module S-FUNCTION BUILDER allows to solve challenges and to pass to more difficult imitating modelling with participation of the person.

Keywords: MATLAB/SIMULINK, the module S-FUNCTION BUILDER, its adjustment and programming in language C/C++.



Владимир Георгиевич Михайлов канд. техн. наук 05.05.03, РБ, Минск. Специалист в области разработки систем CALS/PLM (PDM, ERP), программирования в Windows, Raspdebian (Linux), MC, Arduino, Raspberry, автомобилестроения, моделирования динамических систем в пакетах MATLAB\SIMULIK, оценки напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS, испытаниям подвесок, рам ТС, пневматики, гидравлики, тензометрирования, Tel.: +375-(029)785-09-16. E-mail: sapr7@mail.ru.

Mikhailov Vladimir (S'72–M'76–SM'80) received the D. degree (Cand. Tech.Sci., mechanical Engineering) from the Belarussian Polytechnical institute of Belarus, Minsk, in 1982.

He was a Senior Research and Engineer-designer at Minsk Automobile plant, from 1972 to 1984, Leading Research, Chief of Research laboratory in CenterSystem, Minsk (design and development ERP) from 1984 to 1991, and was leading Engineer-designer at Minsk Wheel plant from 1994 to 2010, from 2010 to 2017 was a leading engineer of Open Stock Company «Midivisana», Republic Belarus, Minsk. His research interests include design and development of Software PDM, ERP, application Oracle on C++, PL/SQL, Java, programming MC, modeling dynamic systems, vibration.

The expert in the field of system engineering CALS/PLM (PDM, ERP), programming MC, motor industry, modeling of dynamic systems in packets MATLAB\SIMULIK (with S-Function Builder), estimations of the intense-deformed state in packet ANSYS, to tests of suspension, frames of the vehicle, a pneumatics, hydraulics.

УДК 004.41: 004.65: 004.67

Л. В. РУДИКОВА, О. Р. МЫСЛИВЕЦ

О КОНЦЕПЦИИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ АГРЕГАЦИИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Учреждение образования
«Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Актуальным представляется разработка общей концепции и реализация системы хранения и анализа данных практико-ориентированной направленности, одной из подсистем которой является аналитическая система накопления и анализа данных пользователей социальных сетей. Данные, которые пользователи оставляют о себе в социальных сетях, могут быть полезны при решении различных задач. В предлагаемой статье описывается предметная область, связанная со сбором и хранением данных пользователей социальных сетей. Исходя из предметной области, предлагается общая архитектура универсальной системы сбора и хранения данных, которая базируется на клиент-серверной архитектуре. Для серверной части системы приводится фрагмент модели данных, которая связана с накоплением данных из внешних источников. Описывается каркас архитектуры системы. Разрабатываемая универсальная система базируется на информационной технологии складирования данных и для нее характерны следующие аспекты: расширяемая комплексная предметная область, интегрированность хранимых данных, которые поступают из различных источников, инвариантность хранимых данных во времени с обязательными метками, относительно высокая стабильность данных, поиск необходимых компромиссов в избыточности данных, модульность отдельных блоков системы, гибкость и расширяемость архитектуры, высокие требования к безопасности хранимых данных.

Предлагаемая система организует процесс сбора данных и заполнения базы из сторонних источников. Для этого в системе разработан модуль для сбора и преобразования информации из Интернет-источников и отправки их в базу данных. Система предназначена для различных пользователей, заинтересованных в анализе данных пользователей социальных сетей.

Ключевые слова: OLTP-система, социальные сети, модель данных, общая архитектура, ETL-процесс; клиент-сервер; подсистема анализа

Введение

В настоящее время актуальным представляется разработка общей концепции и реализации системы сбора и анализа данных социальных сообществ в сети Интернет, которая может быть рассмотрена в аспекте создания некоего единого хранилища данных, позволяющего производить анализ данных пользователей социальных сетей по необходимым требованиям [1, 2].

Исследование и обобщение предметных областей различной тематики является достаточно актуальным направлением исследований [3, 4]. В настоящее время все большее число исследователей используют большие данные для оценки различных аспектов человеческой деятельности, включая мобильность человека. Например, наборы такого рода данных исполь-

зуются для регионального разграничения в различных масштабах [5], классификации землепользования [6], оптимизации транспортировки [7] и исследований в области транспорта [8], подсчета социально-экономических показателей городских кварталов [9], изучение туристического поведения [10], данных о миграции людей [11, 12] и т. д.

Следует также отметить, что в мире накапливается огромное количество информации, разработаны различные методы, алгоритмы и методологии для анализа данных [см., например, 13, 14, 15], существует достаточное количество необходимого программного обеспечения, технологий и методов для формализации массивов данных, которые позволяют структурировать данные конкретных направлений исследований.



Рис. 1. Упрощенная схема системы сбора и анализа данных социальных сетей

В связи с вышеизложенным, анализ данных социальных сетей является на текущий момент довольно перспективным направлением с широкой сферой применения полученных в процессе анализа результатов. Во-первых, данные социальных профилей пользователей нашли своей применение в области моделирования распространения информационной волны в социальных сетях. Во-вторых, различного рода предвыборные и маркетинговые компании довольно сильно опираются также на данные пользователей социальных сетей: данные такого рода позволяют более эффективно подстраивать агитационные компании под нужды электората. В-третьих, наиболее распространенной сферой применения данных социальных сетей является выявление потребительских предпочтений [16].

Однако на рынке программного обеспечения отсутствуют универсальные программные системы для обработки данных социальных сетей, которые включают в себя получение данных из различных источников, их хранение в определенном формате в течении длительного времени и предоставление расширенного инструментария обработки данных в соответствии с различными группами пользователей. В силу этого предлагаемая концепция системы агрегации данных социальных сетей и, непосредственно, разрабатываемая система является новой, не имеющей аналогов, разработкой, которая будет востребована широким кругом пользователей.

О предметной области системы агрегации и обработки данных социальных сетей

В рамках рассматриваемой тематики за основу хранимых и обрабатываемых данных принимается информация о пользователях различных социальных сетей (Вконтакте, Facebook, Instagramm, LiveJournal и др.), их деятельности, привычках, предпочтениях и взаимодействии с окружающим социумом, как реальным, так и виртуальным. Все данные, которые будут использоваться системой, находятся в открытом доступе и предоставление их пользователями системы является добровольным.

Отметим, что разрабатываемая универсальная система базируется на информационной технологии складирования данных и для нее характерны следующие аспекты: расширяемая комплексная предметная область, интегрированность хранимых данных, которые поступают из различных источников, инвариантность хранимых данных во времени с обязательными метками, относительно высокая стабильность данных, поиск необходимых компромиссов в избыточности данных, модульность отдельных блоков системы, гибкость и расширяемость архитектуры, высокие требования к безопасности хранимых данных.

На рис. 1 представлена упрощенная схема работы системы сбора и анализа данных социальных сообществ в сети Интернет.

Основная концепция предполагаемой системы сбора и анализа данных социальных сообществ в сети Интернет основана на техноло-

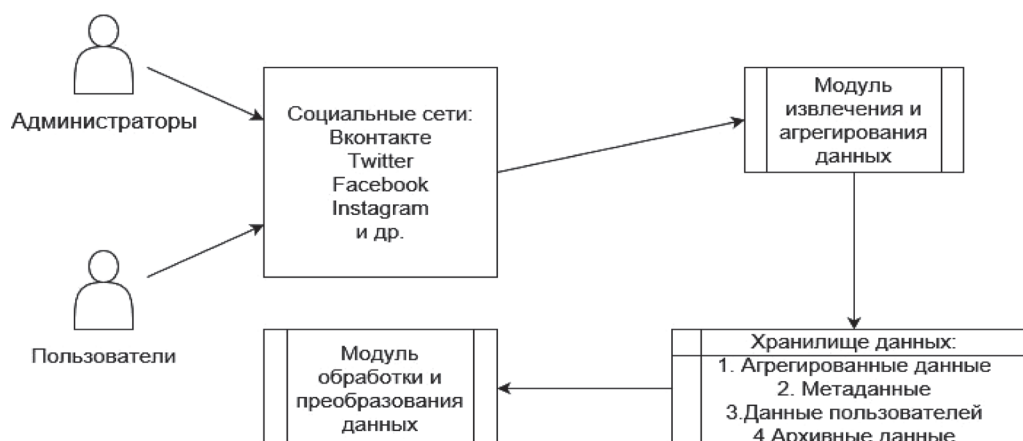


Рис. 2. Общая структура модуля получения и хранения информации

гии складирования данных. Разработка системы ведется с учетом того факта, что функционалом системы будет пользоваться широкий круг лиц для поддержки задач принятия решений предметных областей. В процессе работы возможности системы будут расти, что скажется на ее ресурсоемкости. При построении данной системы следует учитывать принцип модульности, а, конкретно, предполагается наличие как минимум четырех модулей: модуль получения и хранения информации, модуль анализа данных, модуль администрирования системы, модуль, предоставляющий пользователям интерфейс для работы с системой.

Общая структура системы хранения и обработки данных социальных сообществ в сети Интернет

Система сбора и анализа данных пользователей социальных сетей состоит из трех основных модулей:

- модуль сбора и хранения информации;
- модуль анализа собранной информации;
- модуль, предоставляющий конечным пользователям системы графический интерфейс.

На рис. 2 представлена общая структура системы сбора и анализа данных социальных сообществ в сети Интернет.

При разработке и проектировании такого рода модуля поднимаются вопросы, связанные с изменениями политик конфиденциальности данных и постепенной модификации структуры и функционала многих социальных сетей.

Отметим, что для разработки основных моделей системы использованы объектно-ориентированный подход и структурная методология построения программных систем.

Использование данных социальных сетей

В настоящее время данные, полученные из социальных сетей, используются во многих сферах деятельности, начиная от простого выявления потребительских предпочтений, заканчивая анализом социальных графов, использованием данных пользователей для конкурентной разведки и т. д. Результаты такого анализа могут свидетельствовать о скрытых предпочтениях индивидуума гораздо больше, чем информация в его профиле. Однако данные такого рода представляют собой плохо структурированный набор информации [17]. Это означает, что при разработке системы встает проблема правильной обработки приходящих в подсистему хранения данных. Для решения этой проблемы, как правило, используется ETL-процесс [18], который представляет собой процесс извлечения (получения) информации из OLTP-систем (баз данных), затем ее дальнейшее преобразование к формату хранимых данных в хранилище, и непосредственной загрузки данных в хранилище. Учитывая тот факт, что данные собираются из различных социальных сетей, где информация может быть представлена в различных форматах и нести в себе различную информационную нагрузку, использование имеющегося программного обеспечения не является возможным. Разработка собственного программного решения, которое будет обрабатывать данные согласно необходимым требованиям, является наиболее предпочтительным вариантом. При разработке предполагаемой системы также учитываются возможные ограничения социальных сетей на возможность получения данных. Во всех социальных

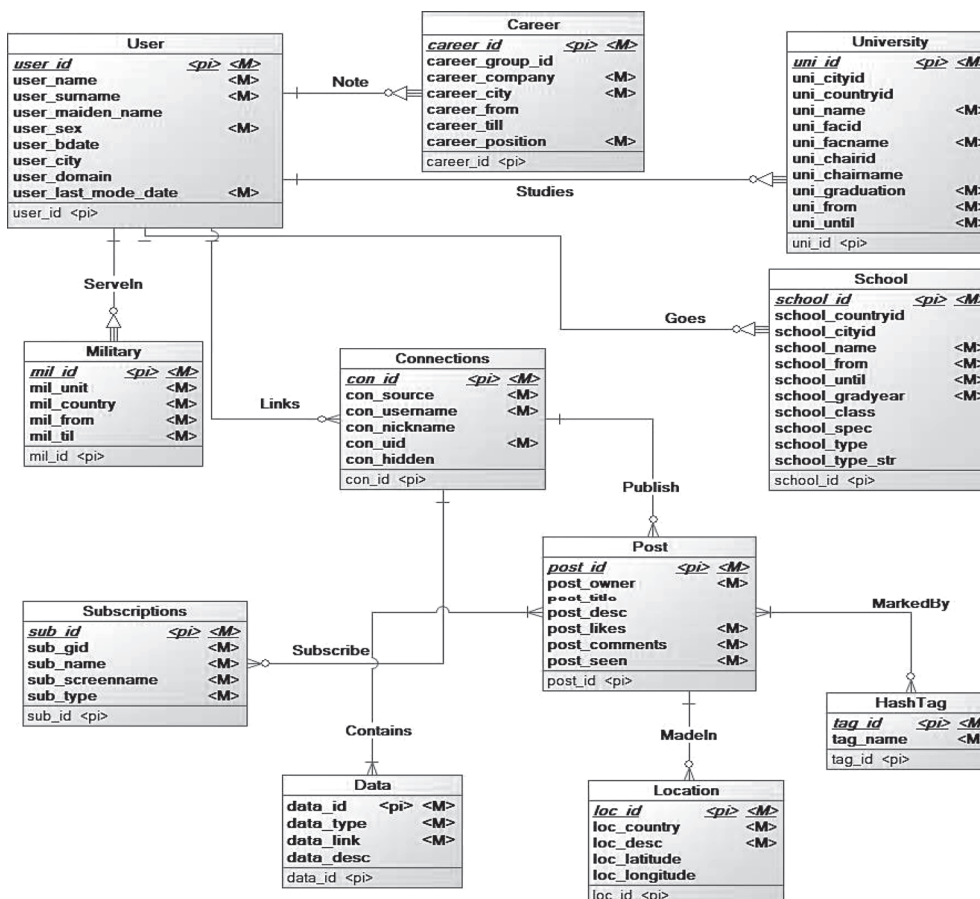


Рис. 3. Фрагмент концептуальной модели базы данных для хранения информации о пользователях

сетях существуют, так называемые, настройки приватности. В зависимости от желания пользователя скрыть некоторые данные о самом себе от определенного круга людей, подсистема может (и получит) только часть данных, что, в последствии, может сказаться на конечном результате анализа его предпочтений. Возможны следующие варианты получения данных.

Во-первых, прямой разбор страницы с профилем пользователя (требует разработки дополнительного функционала, однако он сложен в реализации с учетом растущего количества социальных сетей).

Во-вторых, использование данных, собранных за определенный промежуток времени. Такие данные могут показать динамику изменения предпочтений пользователя.

В разрабатываемой системе агрегации и хранения данных используется второй способ, так как на данный момент ограничения приватности не позволяют получить скрытую информацию как при ручном разборе страницы, так и при использовании соответствующего API.

Централизованное хранение данных из различных социальных сетей

Как было сказано выше, данные социальных сетей характеризуются плохой структурированностью. В силу этого возникает вопрос, как эффективно хранить данные разных социальных сетей в одной базе данных. Некоторые социальные сети делают упор на обмен сообщениями (Twitter), некоторые на размещение пользователями текстов большого объема (Livejournal), однако большинство социальных сетей представляют возможность агрегации данных различного формата (например, ВКонтакте Facebook). Централизованное хранение данных из различных социальных сетей тоже является важной проблемой, которую необходимо решить при разработке подсистемы сбора и хранения данных.

На рис. 3 представлен фрагмент концептуальной модели базы данных, которая позволит эффективно хранить данные их различных социальных сетей.

Подсистема агрегации и хранения данных на текущий момент включает следующую ин-

формацию о пользователях: основную информацию о пользователе, список социальных сетей в которых пользователь зарегистрирован, информацию об образовании, местах работы. Важным фактором является возможность хранения всех сообществ, на которые пользователь подписан во всех социальных сетях. Отметим, что основной сущностью концептуальной модели является сущность Posts, где хранятся все материалы, опубликованные пользователем в разных форматах (текст, видео, фотографии и т. д.) с возможностью отслеживания хеш-тегов.

Деперсонализация данных

При разработке подсистемы агрегации и хранения данных важно учитывать и аспект безопасности хранимых данных. Законодательства многих стран очень серьезно относятся к проблеме защиты персональных данных. Согласно требованиям о защите персональных данных, деперсонализация должна обеспечивать не только защиту от несанкционированного использования, но и возможность их обработки [19], т. е. данные после деперсонализации должны обладать рядом свойств, к которым относятся:

- полнота – сохранение информации о конкретном пользователе;
- структурированность – сохранение правильных структурных связей между деперсонализированными данными;
- релевантность – возможность обработки запросов по обработке персональных данных и получения ответов в одинаковой семантической форме;
- применимость – возможность решения задач обработки персональных данных, без предварительного деобезличивания всего объема данных о пользователе;
- анонимность – невозможность однозначной идентификации субъектов данных, полученных в результате деперсонализации, без применения дополнительной информации.

Однако при разработке общей системы анализа социальных сообществ полная деперсонализация не является возможной, т. к. в конечном итоге пользователю системы необходимо знать конкретную информацию о пользователе. Реально возможно лишь частичное достижение анонимности хранимых данных. В системе предлагается шифровать как основную информацию о пользователях (имя, фами-

лия, дата рождения, адрес), так и всю базу данных для предотвращения несанкционированного доступа, в целом. Для предотвращения несанкционированного доступа к самой системе, на которой работает сервис, следует использовать соответствующие политики безопасности, поддерживаемые сервером баз данных, а также некомпьютерные средства контроля.

Данные, собранные подсистемой агрегации и хранения, будут использоваться в следующих задачах.

Сегментирование аудитории. В отличие от вышеописанных методов использования данных социальных сетей, разрабатываемая система предполагает возможность сегментирования аудитории по различным признакам. Таким образом, система позволяет разделять пользователей по их интересам и предлагать им соответствующие сообщества. Кроме того, системой делаются предположения о том, какие сообщества заинтересовали бы пользователя в зависимости от публикуемой им информации.

Для распространения «цепляющего» контента для сообществ. Продвижение определенного контента, связанного, например, с некоторыми товарами и услугами, будет происходить более эффективно, если предварительно проанализировать возможную аудиторию. Проблема обоюдная: пользователи определенных узконаправленных сообществ могут и не догадываться о том, что в мире появилась вещь или услуга, которая может их заинтересовать и, наоборот, многие производители товаров и услуг охватывают слишком маленькую аудиторию, не пытаясь как-нибудь более эффективно позиционировать себя. Разрабатываемая система представляет информацию о том, на какие сообщества стоит обратить внимания.

Кроме того, общая система анализа социальных сообществ будет использовать полученные данные для построения и анализа графов интересов. Каждый пользователь может получить информацию о людях, с которыми у него могут быть общие интересы в сообществах. Однако возможно использование полученной информации и в противоположных целях: если сообщества являются деструктивными, то данные могут быть использованы для превентивных мер.

Рекомендации по выбору программных средств

Разрабатываемая система и, в частности, модуль хранения данных, включает в себя единое централизованное хранилище данных, систему обработки данных и систему отчетности. В хранилище данных информация хранится в специально реорганизованном виде в соответствии с разработанной структурой хранения, содержащей необходимые измерения и агрегированные факты предметной области. В связи с этим для разработки модуля сбора и хранения данных используется база данных объектно-реляционного типа MSSQL-Server. В случае использования NoSQL-решений при построении подобных подсистем особых различий в производительности замечено не было [20], однако требования структуризации в NoSQL не выполняются, что затрудняет, в дальнейшем, анализ данных. Программные решения компании Microsoft (СУБД MSSQL, платформы Azure и Business Intelligence) являются более оптимальным решением при построении всей системы, так как дают возможность обеспечить необходимую безопасность данных с использованием механизмов защиты информации, а также обеспечить конфиденци-

альность и целостность данных с использованием Active Directory.

Заключение

Разработка общей концепции и реализация системы сбора и анализа данных социальных сообществ в сети Интернет является актуальной темой исследований. Социальные сети в настоящее время стали не только местом общения людей, а также и местом, где каждый пользователь собирает и предоставляет различную информацию другим пользователям. Различные взаимосвязи пользователей создают социальные сообщества, анализ и исследование которых позволит определять перспективы использования определенных ресурсов, делать анализ возможных закономерностей по имеющимся массивам данных, а также отслеживать влияние различных факторов на развитие этих сообществ. Предлагаемая система агрегации и обработки данных позволит собирать достаточно обширные сведения по социальным сообществам включая их пользователей, а также получать необходимые аналитические сводки, проводить обработку данных и применять соответствующие методы и алгоритмы Data Mining.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудикова, Л. В. Об общей архитектуре универсальной системы хранения и обработки данных практико-ориентированной направленности // Л.В. Рудикова / Системный анализ и прикладная информатика. – Мн.: БНТУ, 2017. – № 2. – С. 12–19.
2. Рудикова, Л. В. О моделировании данных предметных-областей практико-ориентированной направленности для универсальной системы складирования и обработки данных// Л. В. Рудикова, Е. В. Жавнерко / Системный анализ и прикладная информатика. – Мн.: БНТУ, 2017. – №3. – С. 19–26.
3. Belyi, A. Global multi-layer network of human mobility //Alexander Belyi, Iva Bojic, Stanislav Sobolevsky, Izabela Sitko, Bartosz Hawelka, Lada Rudikova, Alexander Kurbatski, Carlo Ratti / International Journal of Geographical Information Science. – 2017. – Volume 31. – P. 1381–1402.
4. Белый, А. Б. Данные сервиса Flickr и структура сообществ стран // А. Б. Белый, Л. В. Рудикова, С. Л. Соболевский, А. Н. Курбацкий / Международный конгресс по информатике: информационные системы и технологии = International Congress on Computer Sciens : Information Systems and Technologies : материалы Междунар. науч. конгресса, Минск, 24 окт.–27 нояб. 2016 г. / БГУ; редкол.: С.В. Абламейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – С. 851–855.
5. Amini A. The impact of social segregation on human mobility in developing and industrialized regions / Amini A, Kung K, Kang C, Sobolevsky S, and Ratti C // EPJ Data Science. – 2014. – 3(1):6.
6. Pei T. A new insight into land use classification based on aggregated mobile phone data / Pei T., Sobolevsky S., Ratti C., Shaw S. L., Li T., Zhou, C. // International Journal of Geographical Information Science. – 2014. – 28(9). – P. 1988–2007.
7. Santi P. Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks / Santi P., Resta G., Szell M., Sobolevsky S., Strogatz S.H., Ratti C. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – 111(37). – Pp. 13290–13294.
8. Kung K. Exploring universal patterns in human home/work commuting from mobile phone data / Kung K., Greco K., Sobolevsky S., Ratti C. // PLoS ONE. – 2014. – 9(6):e96180.
9. Hashemian B. Socioeconomic characterization of regions through the lens of individual financial transactions / Hashemian B., Massaro E., Bojic I., Arias J. M., Sobolevsky S., Ratti C. // PloS one – 2017. – 12(11), e0187031.
10. Bojic I. Scaling of foreign attractiveness for countries and states / Bojic I., Belyi, A., Ratt, C., Sobolevsky S. // Applied Geography. – 2016 – 73. – P. 47–52.
11. Sabou M. Visualizing Statistical Linked Knowledge Sources for Decision Support / Sabou M., Hubmann-Haidvogel A., Fischl D., Scharl A. // SemanticWeb. – 2016. – 1. – P. 1–25.

12. **Li Q.** VisTravel: visualizing tourism network opinion from the user generated content / Li Q., Wu Y., Wang S., Lin M., Feng X., Wang H. // *J. Vis.* – 2016. – 19. – P. 489–502.
13. **Рудикова, Л. В.** О разработке системы для поддержки лазерной экспрессной экспертизы. Монография / Л. В. Рудикова – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 134 с.
14. **Барсегян А.** Методы и модели анализа данных: OLAP и DataMining / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко, И. И. Холод. – СПб: БХВ-Петербург, 2009. – 336 с.: ил.
15. **Паклин, Н.** Бизнес-аналитика. От данных к знаниям / Н. Паклин, В. Орешков. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.
16. **Информационный центр AfterShock** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<https://aftershock.news/?q=node/479258&full>]. – Дата доступа: [14.05.2018].
17. **Батура, Т. В.** Методы анализа данных из социальных сетей / Т.В. Батура, Н. С. Копылова, Ф. А. Мурзин, А. В. Проскуряков // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* – 2013. – Т. 11, вып. 3. – С. 5–21.
18. **Среда ETL** (извлечение, преобразование и загрузка) Rational Insight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSRL5J_1.1.1/com.ibm.rational.raer.overview.doc/topics/c_arch_etl_process.html]. – Дата доступа: [14.09.2018].
19. **GDPR** — новые правила обработки персональных данных в Европе для международного IT-рынка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<https://habr.com/company/digitalrightscenter/blog/344064/>]. – Дата доступа: [17.05.2018].
20. **Волушкова В.Л.** Структура данных для хранения информации в социальных сетях / В. Л. Волушкова, А. Ю. Волушкова // *Образовательные ресурсы и технологии* – 2014. – 2(5). – С. 153–157.

REFERENCES

1. **Rudikova, L. V.** On the general architecture of a universal data storage and processing system of practice-oriented orientation. Rudikova / *System Analysis and Applied Informatics.* – Mn.: BNTU, 2017. – № 2. – P. 12–19.
2. **Rudikova, L. V.** On modeling data of subject-areas of practice-oriented orientation for a universal system of data warehousing and data processing // L. V. Rudikova, E. V. Zhavnerko / *System Analysis and Applied Informatics.* – Mn.: BNTU, 2017. – № 3. – P. 19–26.
3. **Belyi, A.** Global multi-layer network of human mobility // Alexander Belyi, Iva Bojic, Stanislav Sobolevsky, Izabela Sitko, Bartosz Hawelka, Lada Rudikova, Alexander Kurbatski, Carlo Ratti / *International Journal of Geographical Information Science.* – 2017. – Vol. 31. – P. 1381–1402.
4. **Belyi, A. B.** Flickr service data and community structure of countries / A.B. Belyi, L.V. Rudikova, S.L. Sobolevsky, A.N. Kurbatski // *International Congress on Computer Sciens: Information Systems and Technologies: materials of International Scientific Congress, Republic of Belarus, Minsk, 24 October. – 27 Nov. 2016.* / BSU; rare: S.V. Ablameiko (editorial editors) [and others]. – Minsk, 2016. – P. 851–855.
5. **Amini A.** The impact of social segregation on human mobility in developing and industrialized regions / Amini A, Kung K, Kang C, Sobolevsky S, and Ratti C // *EPJ Data Science.* – 2014. – 3(1):6.
6. **Pei T.** A new insight into land use classification based on aggregated mobile phone data / Pei T., Sobolevsky S., Ratti C., Shaw S. L., Li T., Zhou, C. // *International Journal of Geographical Information Science.* – 2014. – 28(9), P. 1988–2007.
7. **Santi P.** Quantifying the benefits of vehicle pooling with shareability networks / Santi P., Resta G., Szell M., Sobolevsky S., Strogatz S.H., Ratti C. // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 2014. – 111(37). – Pp. 13290–13294.
8. **Kung K.** Exploring universal patterns in human home/work commuting from mobile phone data / Kung K., Greco K., Sobolevsky S., Ratti C. // *PLoS ONE.* – 2014. – 9(6):e96180.
9. **Hashemian B.** Socioeconomic characterization of regions through the lens of individual financial transactions / Hashemian B., Massaro E., Bojic I., Arias J. M., Sobolevsky S., Ratti C. // *PloS one* – 2017 – 12(11), e0187031.
10. **Bojic I.** Scaling of foreign attractiveness for countries and states / Bojic I., Belyi, A., Ratt, C., Sobolevsky S. // *Applied Geography.* – 2016. – 73. – P. 47–52.
11. **Sabou M.** Visualizing Statistical Linked Knowledge Sources for Decision Support / Sabou M., Hubmann-Haidvogel A., Fischl D., Scharl A. // *SemanticWeb.* – 2016 – 1. – P. 1–25.
12. **Li Q.** VisTravel: visualizing tourism network opinion from the user generated content / Li Q., Wu Y., Wang S., Lin M., Feng X., Wang H. // *J. Vis.* – 2016. – 19. – P. 489–502.
13. **Rudikova, L.** About laser express expertise system implementation. Monography / Lada Rudikova. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 134 p.
14. **Barseghyan, A.** Methods and analysis data models: OLAP and DataMining / A. Barseghyan, M. Kupriyanov, V. Stepanenko, I. Kholod – StP.: BHV-Petersburg, 2009. – 336 p.: il.
15. **Paklin, N.** Business-analytics: from data to knowledge / N. Paklin, V. Oreshkov. – StP.: Piter, 2009. – 624 p.
16. **Информационный центр AfterShock** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [<https://aftershock.news/?q=node/479258&full>]. – Дата доступа: [14.05.2018].
17. **Batura, T. V.** Methods of analyzing data from social networks / T. B. Batura, N. S. Kopylova, F. A. Murzin, A. V. Proskuryakov // *Bulletin of NSU. Series: Information technology.* – 2013. – Vol. 11, issue. 3. – P. 5–21.
18. **ETL environment** (extraction, transformation and loading) Rational Insight [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/ru/SSRL5J_1.1.1/com.ibm.rational.raer.overview.doc/topics/c_arch_etl_process.html]. – Access date: [14.09.2018].
19. **GDPR** – new rules for the processing of personal data in Europe for the international IT market [Electronic resource]. – Access mode: [<https://habr.com/company/digitalrightscenter/blog/344064/>]. – Access date: [May 14.05.2018].

20. Volushkova V. L. Data structure for storing information in social networks / V. L. Volushkova, A. Y. Volushkova // Educational resources and technologies. – 2014. – 2 (5). – P. 153–157.

Поступила
23.05.2018

После доработки
25.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

Rudikova L. V., Myslivec O. R.

ABOUT A CONCEPT OF CREATING A SOCIAL NETWORK USERS INFORMATION AGGREGATION AND DATA PROCESSING SYSTEM

Yanka Kupala State University of Grodno

The development of a general concept and implementation of a data-storage and analysis system for practice oriented data, one of the subsystems of which is an analytical system for the accumulation and analysis of data from users of social networks, is topical. The development of a general concept and implementation of a data-storage and analysis system for practice oriented data, one of the subsystems of which is an analytical system for the accumulation and analysis of data from users of social networks, is topical. Data that users leave about themselves in social networks can be useful in solving various tasks. The proposed article describes the subject area associated with the collection and storage of data from users of social networks. Proceeding from the subject area, the general architecture of the universal data collection and storage system is proposed, which is based on the client-server architecture. For the server side of the system, a fragment of the data model is provided, which is associated with the accumulation of data from external sources. The framework of the system architecture is described. The developed universal system is based on the information technology of data warehousing, and it has the following aspects: an expandable complex subject area, the integration of stored data that come from various sources, the invariance of stored data in time with mandatory labels, relatively high data stability, the search for necessary trade-offs in data redundancy, modularity of individual system units, flexibility and extensibility of the architecture, high security requirements vulnerable data.

The proposed system organizes the process of collecting data and filling the database from external sources. To do this, the system has a module for collecting and converting information from third-party Internet sources and sending them to the database. The system is intended for various users interested in analyzing data of users of social networks.

Keywords: OLTP-system, social networks, data model, general architecture, client-server; analysis subsystem, ETL-process.



Рудикова Лада Владимировна

Ул. Ожешко. 22, 212, Гродно, 230023, Беларусь, rudikowa@gmail.com

Тел. +375 297 816 355; ГрГУ, зав. кафедрой современных технологий программирования, кандидат физико-математических наук

Lada Rudikova is the Head of Modern Programming Technologies Department of Yanka Kupala State University of Grodno (YKSUG). Ph.D. degree in physical and math.

The main line of her scientific researches – management theory, information systems design, databases, CASE, data mining, business intelligence. She actively participates in international conferences. She is the author of more than 280 scientific works and books related to computer technology and data processing, a technical writer of the publishing house «BHV-St Petersburg».



Мысливец Олег Романович

Ул. Ожешко. 22, 212, Гродно, 230023, Беларусь, myslivec.oleg@yandex.ru

Тел. +375 336 882 079, ГрГУ, преподаватель кафедры современных технологий программирования, магистр технических наук

Oleg Myslivec is a lecturer in Yanka Kupala Grodno State University. Master degree in computer science.

The main line of his scientific researches – information systems design, databases, CASE, big data analysis.

Результаты работы получены в процессе выполнения ГПНИ «Разработка методологии и средств построения универсальных систем хранения, обработки и анализа структурированных данных большого объема практико-ориентированной направленности» (№ гос. регистрации 20162266).

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

УДК 004.42:81'33

М. В. МАКАРИЧ, Ю. Б. ПОПОВА, М. А. ШВЕД

ЛИНГВИСТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АНГЛО-БЕЛАРУСКО-РУССКОГО СЛОВАРЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕРМИНОВ

Белорусский национальный технический университет

Центральным объектом компьютерной лексикографии является компьютерный или электронный словарь, который должен обладать достаточно большим словарным объемом, обеспечивать последовательное извлечение информации и, в зависимости от потребностей пользователя, предоставлять полную грамматическую информацию о словах входного и выходного языков. Принимая во внимание современную тенденцию в разработке специальных терминологических словарей, авторами предлагается англо-беларуско-русский словарь технических терминов. На начальном этапе работы словарь получил название TechLex и охватывает следующие предметные области: архитектура и строительство, водоснабжение, информационные технологии, педагогика, транспортные коммуникации, экономика, энергетика. В настоящее время каждая предметная область словаря содержит около 1000 терминов, расположенных в сети Интернет в Google Таблице с возможностью одновременного заполнения несколькими преподавателями. Лингвистическая база данных словаря составлена не традиционным способом переработки большого количества бумажных словарей и объединения полученных переводов, а путем последовательной обработки научно-технических англоязычных периодических изданий отдельных предметных областей. Программное обеспечение предлагаемого электронного словаря спроектировано с учетом анализа современных электронных многоязычных переводных словарей и представляет собой клиент-серверное приложение на языке программирования Java. Клиентская часть системы содержит мобильное приложение для операционной системы Android, которое было протестировано на планшетах и смартфонах с различными диагоналями экрана. Интерфейс словаря TechLex разработан таким образом, что в соответствии с запросом активизируется лишь отдельно взятая зона, поэтому нет необходимости просматривать все предметные области словаря. Предлагаемый словарь TechLex является первым техническим многоязычным электронным словарем, имеющим англо-беларуско-русскую версию.

Ключевые слова: электронный словарь, компьютерный словарь, англо-беларуско-русский словарь, словарь технических терминов, электронный технический словарь, словарь TechLex.

Введение. Современная компьютерная лексикография практически полностью заменила существовавшие в течение многих столетий традиционные ручные и рукописные лексикографические практики на новые безбумажные информационные технологии. Данное направление является одним из разделов прикладной лингвистики и представлено совокупностью методов и программных средств обработки текстовой информации для создания словарей [1, с. 45]. Центральным объектом компьютерной лексикографии является компьютерный или электронный словарь, под которым понимается любое лексикографическое произведение на машинных носителях, снабженное программами автоматической обработки и наполнения [2, с. 36].

Идея создания электронных словарей возникла в результате исследований «по определению вида и количества ошибок, совершаемых переводчиком при переводе текстов различной трудности, и по подсчету времени, которое затрачивает переводчик на поиск в словарях и справочниках незнакомых ему слов» [3, с. 12]. Сегодня широко распространены электронные версии самых различных словарей. В отличие от традиционных словарей электронный словарь наряду с текстом и графическими изображениями может содержать весь спектр медиа объектов, включая видео и анимационные фрагменты, звук, музыку, графику и т. д.

Все электронные словари можно разделить на два типа: автоматические словари конечно-

го пользователя и автоматические словари для программ обработки текста (это информационно-поисковые тезаурусы, частотные словари, рубрикаторы, классификаторы, словари морфологического анализа, словари для машинного перевода) [4, с. 21]. Важной особенностью электронного словаря является его гипертекстовое устройство. Ссылки, внедренные в слова, фразы или рисунки, позволяют пользователю выбрать текст или рисунок и немедленно вывести на экран связанные с ним сведения и мультимедийные материалы. Взаимоотношения между компонентами словарной статьи не являются линейными. Словарная статья имеет четкую логическую структуру с иерархическими связями между элементами. Каждая информационная категория занимает здесь строго фиксированное место – «зону». Пользователь, проявляя интерес к той или иной информации, запрашивает определенный параметр и получает доступ к отдельным фрагментам статьи. В соответствии с запросом активизируется лишь отдельно взятая зона, поэтому нет необходимости просматривать всю статью.

Электронные словари имеют серьезные преимущества по сравнению со своими бумажными аналогами, что проявляется в быстром росте соответствующего рынка. Электронный словарь принципиально может обойти ключевое противоречие книжной лексикографии: чем больше информации предлагает словарь, чем больше развит его научный аппарат, тем сложнее им пользоваться. Особенно это относится к переводным словарям. В данном случае словарный ответ может давать весьма разнообразную информацию о слове или словосочетании, а не просто переводное соответствие, и предполагает активный выбор пользователя из нескольких возможных хорошо обоснованных альтернатив. Электронный словарь может быть двух и более направленным, то есть позволять переводить слова в обоих направлениях и даже с одного языка на другой при посредстве третьего, что является его несомненным достоинством.

Большую роль играет также фактор доступности. Далеко не в каждом беларуском городе можно найти бумажные издания больших иностранных словарей. При этом существует значительное число бесплатных Интернет-ре-

сурсов, представляющих разнообразные лексикографические материалы. Привлекательными факторами для пользователя являются также интерактивность современных электронных словарей и их удобный для пользователя интерфейс.

Нельзя не сказать еще об одном важном аспекте: актуальности лексикографического материала. Большинство словарей, которые сформировались в языковой атмосфере середины прошлого века, сильно устарели. На фоне стремительного развития науки и техники появляются новые отрасли во всех сферах человеческой деятельности. В разговорную речь приходят новые слова, термины, устойчивые словосочетания. Поэтому только электронные словари, которые могут оперативно обновляться, способны предоставить пользователю всю необходимую и полную информацию. Таким образом, современный словарь должен обладать следующими чертами:

1. Достаточным словарным объемом.
2. Обеспечивать последовательное извлечение информации в зависимости от потребности пользователя.
3. Предоставлять полную грамматическую информацию о словах входного и выходного языков и материал по именам собственным с программами по транскрибированию.
4. Предоставлять все необходимые пользователю звуковые, графические и мультимедийные возможности.

Очевидно, что всем перечисленным требованиям могут соответствовать только электронные словари.

1. Краткий обзор существующих электронных словарей. В настоящий момент выпущено довольно большое количество электронных словарей. Для примера возьмем один из наиболее полных и самых популярных в нашей стране автоматических онлайн-словарей: Мультигран (разработчик Андрей Поминов) [5]. Словарная база Мультигран, как и большинства такого рода словарей, создана путём сканирования, распознавания и переработки большого количества бумажных словарей и объединения полученных переводов слов в единую базу данных. Наиболее полно представлены англо-русско-английская, немецко-русско-немецкая и французско-русско-французская части словаря. Наименее полно –

калмыцко-русско-калмыцкая часть словаря. Помимо Интернет-версии, распространяется оффлайн-версия Мультитрана, совместимая с операционными системами Microsoft Windows, Pocket PC, Symbian, Linux. Словарь насчитывает более 800 предметных областей и имеет возможность активного самостоятельного пополнения пользователями. Технологически Мультитрану близок словарь [http:// dict.leo.org](http://dict.leo.org), где каждый перевод является гиперссылкой для получения обратного перевода, в то время как большинство других словарных сайтов предлагают переводы в виде сплошного форматированного текста.

Другим популярным электронным ресурсом является МультиЛекс [6], созданный фирмой МедиаЛингва в 2010 году как цифровая копия «Нового большого англо-русского словаря» под редакцией А. Д. Апресяна. Цель данного подхода – максимально точный перевод традиционного бумажного словаря в электронную форму для платформ Windows XP, Windows 7, Windows Vista. Преимуществом МультиЛекса является встроенный синтезатор звука. Однако полностью доверять такому подходу, не контролируя его по транскрипции, опасно. Синтезатор может неправильно поставить ударение или исказить произношение слова. Имеется также расширенная версия МультиЛекса, где к основному словарю добавлены экономико-финансовый, юридический, строительный, политехнический словари, словарь по полиграфии и издательскому делу. Главный недостаток МультиЛекса – это серьезное отставание каждой из его версий от языковой реальности, как правило, не менее десяти лет. Жесткая привязка МультиЛекса к бумажному прототипу не дает возможности исправлять и дополнять электронный словарь в режиме онлайн, тем более изменять структуру построения словарной статьи.

Поскольку английский язык – это основной язык сети Интернет, преобладающее большинство справочников составляют лингвистические англоязычные словари, представленные одноязычными, двуязычными и многоязычными справочниками. Источники можно найти в каталогах электронных словарей по многим адресам, среди которых наиболее надежными считаются: <http://www.dictionary.com>, <http://www.oz.net/~mev/wg/dictionary>, <http://www.internetoracle.com/>

[dictiona.htm](http://www.councilsales.com/lists/dictionaries), <http://www.councilsales.com/lists/dictionaries>, <http://www.brown.edu/Department/Cog/Ling/Sci/lingdir/dictionary> [7].

Тем не менее существует ряд электронных словарей, которые не могут считаться полностью достоверными. Например, Wikipedia, где зачастую приводятся непроверенные данные, и одна и та же статья на разных языках несет различную информацию. На главной странице сайта создатели говорят о своем словаре как о свободной энциклопедии, которую может создавать каждый. Основным объектом критики здесь является открытая природа проекта, приводящая к недостоверности и ненадежности информации. Таким образом, Wikipedia не следует использовать как первоисточник для проведения серьезных научных исследований.

Интересно отметить, что сегодня многие исследователи выделяют в числе приоритетных специальные словари, регистрирующие и обрабатывающие отдельные терминологические группы лексики, а именно: терминологические словари или словари подязыков, такие, например, как Tropical Medicine Glossary [8], Management and Technology Dictionary [9].

Принимая во внимание все вышеперечисленные факторы, кафедра английского языка № 2 совместно с кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БНТУ начали разработку электронного англо-беларуско-русского словаря технических терминов. На начальном этапе работы словарь получил название TechLex и охватывает следующие предметные области: архитектура и строительство, водоснабжение, информационные технологии, педагогика, транспортные коммуникации, экономика и энергетика.

2. Описание предлагаемой разработки.

В процессе реализации англо-беларуско-русского технического словаря было разработано клиент-серверное приложение на языке программирования Java с использованием архитектурного паттерна MVC (Model-View-Controller). Общая архитектура приложения приведена на рис. 1.

Серверная часть разработанной системы содержит базу данных (БД) MySQL DataBase (DB) и сервер JAVA EE, работающий с помощью контейнера сервлетов TomCat. Клиентская часть системы содержит базу данных

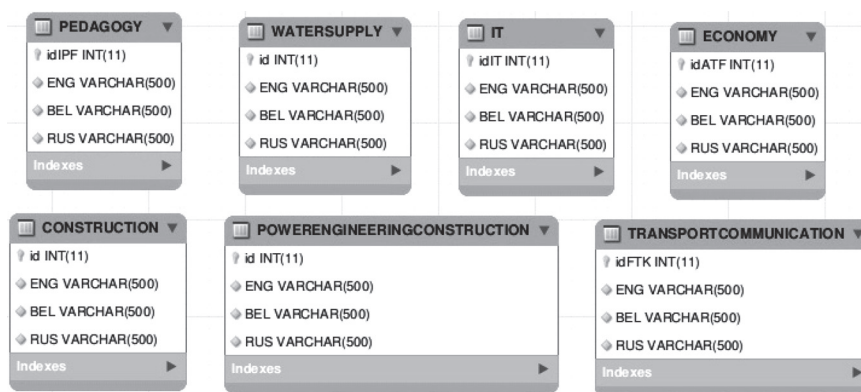


Рис. 3. Схема базы данных электронного словаря

БД. Другие методы предназначены для вывода на экран результатов поиска перевода слов. Класс Creator является вспомогательным, в него вынесена логика для отрисовки окон приложения. Процесс обновления базы данных слов работает параллельно основному потоку благодаря реализации класса ThreadUpdaterDB. При вызове метода run() создаётся поток, работающий с сервером и запрашивающий версию словаря. В случае несоответствия версии скачанного словаря с версией на сервере происходит обновление БД слов на клиенте. Работу с удалённым сервером поддерживает реализация класса OkHttpHandler, которую использует контроллер запросов RequestController. Встроенная SQLite база данных описывается в классе DBHelper и содержит в себе набор таблиц для предметных областей, а также таблицу настроек, позволяющую открывать приложение в том виде, в котором было закрыто. Также используются классы-сущности Faculty, Dictionary, Word для парсинга формата JSON.

Для каждой предметной области предлагаемого словаря в базе данных была создана отдельная таблица с суррогатным первичным ключом в виде колонки id (рис. 3). Связи между таблицами отсутствуют, поскольку в этом нет необходимости. Такая структура позволяет легко обновлять БД в мобильном приложении, т.к. при добавлении новых слов на сервер будет обновляться лишь актуальная таблица без нерационального скачивания всех предметных областей словаря.

В настоящее время каждая предметная область предлагаемого словаря TechLex содержит около 1000 терминов. Поскольку над лингвистическим обеспечением предлагаемого электронного словаря одновременно работает не-

сколько преподавателей, было принято решение о размещении таблицы слов в сети Интернет в таблице Google. Такой формат позволяет оперативно заносить слова, проверять их и экспортировать актуальную версию в базу данных приложения. Фрагмент используемых технических терминов для предметной области информационных технологий приведен на рис. 4.

3. Анализ полученных результатов. Разработанное мобильное приложение для англо-беларуско-русского словаря технических терминов TechLex было протестировано для операционной системы Android на планшетах и смартфонах с различными диагоналями экрана. Для работы со словарем TechLex необходимо сначала выбрать исходный язык технического термина, а затем язык перевода. Выбор возможен из английского, белорусского и русского языков в обоих направлениях. По умолчанию установлен англо-беларуский перевод. Далее требуется выбрать предметную область из перечисленных выше, ввести интересующее слово в поле для поиска и подтвердить действие. После этого появится перевод термина в поле для результатов. Пролитывая остальные предметные области, можно обнаружить другие переводы интересующего термина, поскольку достаточно большое количество слов являются многозначными. Следует также заметить, что выбранная предметная область сохраняется для последующих поисков, поскольку пользователь работает, как правило, именно с ней. На рис. 5 приведены копии экранов мобильного приложения электронного словаря с демонстрацией примеров поиска перевода технических терминов. Так копия экрана слева демонстрирует перевод одного тер-

id	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
293	292	production code	праграмы код	программный код						
294	293	program icon	дыскавод	дисконвод						
295	294	programming language	мова праграмавання	язык программирования						
296	295	Programming Software	ПЗ для праграмавання	ПО для программирования						
297	296	Progress Window	авію, якое адлюстроўвае працэс загрузкі	овню отображающее процесс загрузки						
298	297	Project Management (Software)	ПЗ кіравання праектамі	ПО управления проектами						
299	298	proper example	прыдатны прыклад	подходящий пример						
300	299	PS/2 connector	6-штыровы раз'ём PS/2	6-штыровый разъем PS/2						
301	300	public class	адкрыты клас	открытый класс						
302	301	public static void	адкрыты прабел	открытый пробел						
303	302	punched tape	перфарыраваная стужка	перфорированная лента						
304	303	random access memory (RAM)	памяць з адвольнай выбаркай	память с произвольной выборкой						
305	304	random number generator	генератар выпадковых лічбаў	генератор случайных чисел						
306	305	random-access discrete-address sys	дыскрэтна-адрасная сістэма з адвольным даст	дискретно-адресная система с произвольным доступом						
307	306	random-access	адвольны доступ	произвольный доступ						
308	307	readable test	лігкачытны тэст	удобочитаемый тест						
309	308	Read-only memory (ROM)	энерганезалежная памяць	энергонезависимая память						
310	309	real database	рэальная база дадзеных	реальная база данных						
311	310	real-world unit test	рэальны аўтаномны тэст	реальный автономный тест						
312	311	Record	запіс	запись						
313	312	Recursive fake	рэкурсіўная падробка	рекурсивная подделка						
314	313	Refactor	перапрацавоўваць	перерабатывать						
315	314	Registry	сістэмны рэестр	Системный Регестр						
316	315	regression	рэгрэсія	регрессия						
317	316	relational data model	рэляцыйная мадэль дадзеных	реляционная модель данных						
318	317	relational database	рэляцыйная база дадзеных	реляционная база данных						

Рис. 4. Фрагмент технических терминов словаря TechLex

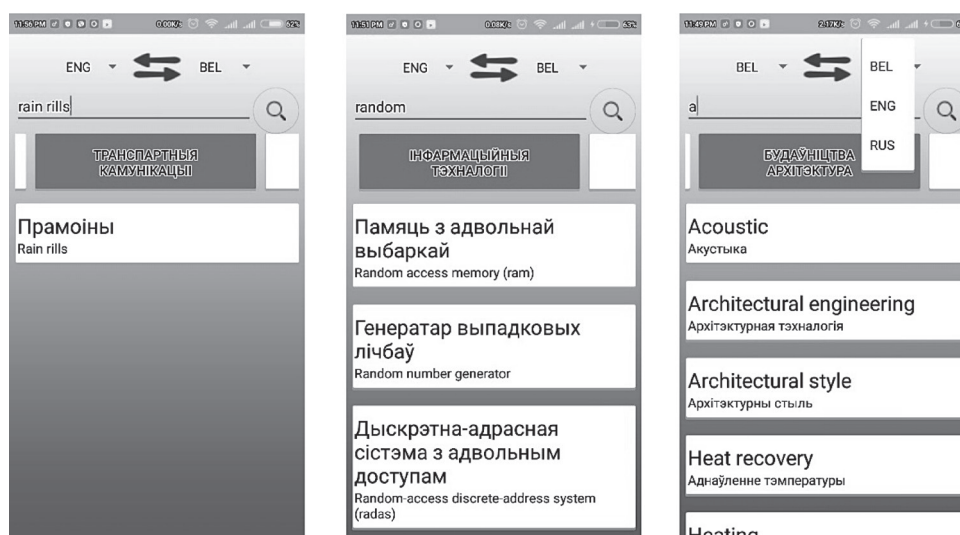


Рис. 5. Копии экранов разработанного мобильного приложения

на «rain rills» из предметной области транспортных коммуникаций с английского языка на белорусский. Центральная копия экрана рис. 5 демонстрирует вывод всех словосочетаний, содержащих термин «random» при переводе с английского языка на белорусский для предметной области информационных технологий. Для сравнения на рис. 4 приведен фрагмент с переводом этих слов (строки 304–307). Копия экрана справа на рис. 5 демонстрирует возможность выбора языка перевода и вывод на экран всех слов английского языка из предметной области строительства и архитектуры, которые в белорусском переводе начинаются на букву «а» либо имеют ее в своем составе.

Заключение. Программное обеспечение предлагаемого англо-беларуско-русского словаря технических терминов спроектировано с учетом анализа современных электронных многоязычных переводных словарей и имеет ряд преимуществ:

1. Это первый технический многоязычный электронный словарь, имеющий англо-беларуско-русскую версию.

2. Интерфейс электронного словаря разработан таким образом, что в соответствии с запросом активизируется лишь отдельно взятая зона, поэтому нет необходимости просматривать все предметные области словаря.

3. Лингвистическая база данных словаря составлена не традиционным способом переработки большого количества бумажных словарей и объединения полученных переводов, а путем последовательной обработки научно-технических англоязычных периодических изданий отдельных предметных областей.

В настоящее время разрабатывается веб-приложение электронного словаря TechLex с размещением в локальной сети Белорусского национального технического университета для проведения занятий в лингафонных кабинетах и использования на стационарных компьютерах. В дальнейшем планируется подключение

обучающей составляющей к электронному словарю с возможностью применения его в автоматизированных системах управления учебным процессом [10].

Материалом для исследования послужили тексты из англоязычных периодических изданий «Architects Journal», «Architectural Digest», «Canadian Journal of Civil Engineering», «Journal of Civil & Environmental Engineering», «Applied Economic Perspectives and Policy», «Economic Development and Cultural Change», «Journal of Financial Economics», «Civil Engineering Journal», «International Journal of Energy», «Energy & Environment».

ЛИТЕРАТУРА

1. Тузлукова, В. И. Типология педагогических лексикографических источников в международной педагогической лексикографии / В. И. Тузлукова // Сб. трудов Второй Международной научно-практич. конф. «Международная педагогическая лексикография в теории и практике обучения в высшей школе» (25–26 августа 2001 года). – С. 78.
2. Герд, А. С. Основы научно-технической лексикографии / А. С. Герд. – Л.: ЛГУ, 1986. – 72 с.
3. Карпова, О. М. Словари издательства HarperCollins: находки и решения / О. М. Карпова // Language and Communication – Issue I. Rostov-on Don, 2001. – 57 с.
4. Баранов, А. Н. Введение в прикладную лингвистику / А. Н. Баранов. – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 360 с.
5. Словарь Мультитран [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// www.multitrans.ru](https://www.multitrans.ru) – Дата доступа: 20.06.2018.
6. Онлайн-словарь МультиЛекс Онлайн теперь можно добавить на любой сайт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.interface.ru/home.asp? artId= 17255](http://www.interface.ru/home.asp?artId=17255) – Дата доступа: 20.06.2018.
7. Кашеварова, И. С. Электронный словарь как новый этап в развитии лексикографии / И. С. Кашеварова // Молодой ученый. – 2010. – № 10. – С. 145–147.
8. Acronyms and Slang // Официальный сайт Acronyms and Slang [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// acronymsandslang.com/definition/4042882/TMG-meaning.html](http://acronymsandslang.com/definition/4042882/TMG-meaning.html) – Дата доступа: 20.06.2018.
9. Management technology dictionary [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// acronymsandslang.com/abbreviation-for/MANAGEMENT-TECHNOLOGY-DICTIONARY.html](http://acronymsandslang.com/abbreviation-for/MANAGEMENT-TECHNOLOGY-DICTIONARY.html) – Дата доступа: 20.06.2018.
10. Попова, Ю. Б. Классификация автоматизированных систем управления обучением / Попова, Ю. Б. // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 2. – С. 51–58.

REFERENCES

1. Tuzlukova, V. I. Tipologija pedagogicheskikh leksikograficheskikh istochnikov v mezhdunarodnoj pedagogicheskoy leksikografii / V. I. Tuzlukova // Sb. trudov Vtoroj Mezhdunarodnoj nauchno-praktich. konf. «Mezhdunarodnaja pedagogicheskaja leksikografija v teorii i praktike obuchenija v vysshej shkole» (25–26 avgusta 2001 goda). – S. 78.
2. Gerd, A. S. Osnovy nauchno-tehnicheskoy leksikografii / A. S. Gerd. – L.: LGU, 1986. – 72 s.
3. Karpova, O. M. Slovarei izdatel'stva HarperCollins: nahodki i reshenija / O. M. Karpova // Language and Communication – Issue I. Rostov-on Don, 2001. – 57 s.
4. Baranov, A. N. Vvedenie v prikladnuju lingvistiku / A. N. Baranov. – M.: Jeditorial URSS, 2001. – 360 s.
5. Slovar' Mul'titrans [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https:// www.multitrans.ru](https://www.multitrans.ru) – Data dostupa: 20.06.2018.
6. Onlajn-slovar' Mul'tiLeks Onlajn teper' mozno dobavit' na ljuvoj sajti [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http:// www.interface.ru/home.asp? artId= 17255](http://www.interface.ru/home.asp?artId=17255) – Data dostupa: 20.06.2018.
7. Kashevarova, I. S. Jelektronnyj slovar' kak novyj jetap v razvitii leksikografii / I. S. Kashevarova // Molodoj uchenyj. – 2010. – № 10. – S. 145–147.
8. Acronyms and Slang // Oficial'nyj sajti Acronyms and Slang [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http:// acronym-sandslang.com/definition/4042882/TMG-meaning.html](http://acronymsandslang.com/definition/4042882/TMG-meaning.html) – Data dostupa: 20.06.2018.
9. Management technology dictionary [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http:// acronym-sandslang.com/abbreviation-for/MANAGEMENT-TECHNOLOGY-DICTIONARY.html](http://acronymsandslang.com/abbreviation-for/MANAGEMENT-TECHNOLOGY-DICTIONARY.html) – Data dostupa: 20.06.2018.
10. Popova, Ju. B. Klassifikacija avtomatizirovannyh sistem upravlenija obucheniem / Popova, Ju. B. // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. – 2016. – № 2. – S. 51–58.

Поступила
19.07.2018

После доработки
25.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

M. V. MAKARYCH, Y. B. POPOVA, M. O. SHVED

LINGUISTIC DATABASE AND SOFTWARE FOR ENGLISH-BELARUSIAN-RUSSIAN DICTIONARY OF TECHNICAL TERMS

Belarusian National Technical University

The central object of computer lexicography is a computer or electronic dictionary, which must have a sufficiently large vocabulary, provide the consistent extraction of information depending on the user's need and provide complete grammatical information about the words of input and output languages. Taking into account the current trend in the development of special terminological dictionaries, the authors propose an English-Belarusian-Russian dictionary of technical terms. At the initial stage of the work the dictionary was named TechLex and covers the following subject areas: architecture and construction, water supply, information technology, pedagogy, transport communications, economics, energy-supply. Currently, each subject area of the dictionary is located in the Internet GoogleTable and contains about 1000 terms. It has the possibility to be simultaneously filled by several teachers. The linguistic database of the dictionary is not created by the traditional way of processing a large number of paper dictionaries and combining the received translations. Lexis from sequential processing of scientific and technical English periodicals of particular subject areas is the base of it. The software of the proposed electronic dictionary is designed taking into account the analysis of modern electronic multilingual translation dictionaries and is a client-server application in Java programming language. The client part of the system contains a mobile application for the Android operating system, which was tested on tablets and smartphones with different screen diagonals. The interface of TechLex dictionary is designed in such a way that only a single zone is activated according to the query, so there is no need to view all the subject areas of the dictionary. The proposed TechLex dictionary is the first technical multilingual electronic dictionary with an English-Belarusian-Russian version.



Макарич Марина Васильевна, доцент, кандидат филологических наук (специальность 10.02.21 – прикладная и математическая лингвистика), доцент кафедры английского языка № 2 БНТУ. Также имеет диплом БНТУ (БПИ, факультет роботов) по специальности – автоматизация и комплексная механизация машиностроения. Научные интересы: педагогический аспект технического образования и лингвистическое обеспечение информационных систем.

Marina V. Makarych, PhD in applied and mathematical linguistics. Associate Professor of the 2nd English Department at the Belarusian National Technical University. In addition she has B. Sc. in robotics. Her scientific interests focus on engineering education and interdisciplinary education that combines linguistics and computer science.

Email: 2348843@tut.by



Попова Юлия Борисовна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем БНТУ. Ее научные интересы связаны с методами и алгоритмами оптимизации технических систем, разработкой адаптивных обучающих систем, автоматизированных систем управления учебным процессом, моделированием знаний, а также с вопросами тестирования и качества программного обеспечения.

Yuliya B. Popova, PhD, Associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. Her research interests focus on methods and algorithms of optimization in technical systems, engineering of adaptive learning systems and learning management systems (LMS), modeling of student knowledge, software testing and quality assurance.

Email: julia_popova@mail.ru



Швед Михаил Олегович, студент четвертого курса специальности «Программное обеспечение информационных технологий» Белорусского национального технического университета. Его научные интересы связаны с технологиями разработки мобильных приложений, возможностями операционной системы Андроид, а также с разработкой веб-приложений.

Mikhail Shved, fourth-year student of the Software specialty of the Belarusian National Technical University. His research interests are related to mobile application development technologies, the capabilities of the Android operating system, and the development of web applications.

Email: Mischa.schwed@gmail.com

Робота выполнялась в рамках науково-дослідницької роботи ГБ 18–201 «Терміналістэмы і адмысловыя тэзаўрусы з пункту гледжання камп'ютарнай лінгвадыдактыкі».

УДК 378. 016: 004.92

О. Г. РЫЛОВА

ОСОБЕННОСТИ ОБУЧЕНИЯ ТРЕХМЕРНОМУ КОМПЬЮТЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ БУДУЩИХ УЧИТЕЛЕЙ ИНФОРМАТИКИ

Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка

Когнитивный, развивающий, иллюстративный потенциал трехмерной компьютерной графики актуализуют обучение будущих педагогов ее технологиям. Будущий учитель информатики должен уметь разрабатывать трехмерные модели, анимации изучаемых объектов (явлений и процессов) по информатике, физике, математике и другим учебным дисциплинам, создавать электронные образовательные ресурсы с трехмерными иллюстрациями, применять дополненную реальность и 3D-печать в профессиональной деятельности.

В статье рассмотрены особенности обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики, выявленные на основе анализа системы подготовки студентов, обучающихся по специальности 1–02 05 02 «Физика и информатика» в Белорусском государственном педагогическом университете имени Максима Танка. Обозначены основные направления совершенствования процесса обучения трехмерной компьютерной графике будущих учителей информатики. В условиях быстрой смены средств и технологий трехмерной компьютерной графики возрастает значимость фундаментальности подготовки педагогических кадров. Предлагается усилить математическую составляющую учебной дисциплины «Компьютерная графика и мультимедиа». Вопросы по трехмерному компьютерному моделированию и визуализации пройдут сквозной содержательной линией через содержание шести учебных дисциплин («Компьютерная графика и мультимедиа», «Вычислительные методы и компьютерное моделирование», «Технологии программирования и методы алгоритмизации», «Основы информационных технологий в образовании», «Методика преподавания информатики», «Архитектура и программное обеспечение вычислительных систем»). Тем самым будет обеспечена системность в введении и изучении понятий, выборе форм и методов обучения, разработке учебно-методического обеспечения. Для реализации междисциплинарности предлагается выполнять практико-ориентированные междисциплинарные учебные проекты в рамках изучения учебных дисциплин трех предметных областей «Информатика», «Физика» и «Математика». Разработка методической системы междисциплинарного обучения позволит обеспечить формирование готовности преподавать трехмерную графику на ступени общего среднего образования и реализовывать ее дидактические возможности при организации учебной и учебно-исследовательской деятельности учащихся.

Ключевые слова: будущий учитель информатики, готовность к профессиональной деятельности, междисциплинарный подход, трехмерная графика, трехмерное компьютерное моделирование, трехмерная компьютерная визуализация.

Введение

В Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2030 года обозначена необходимость повышения качества образования [1]. Одним из путей решения данной задачи выступает интеграция современных информационно-коммуникационных технологий в «традиционную систему образования» [2]. В учебных заведениях общего среднего образования учитель информатики является тем специалистом, который может увлечь, обучить и скоординировать деятельность учителей-предметников в этом направлении

[3]. В связи с этим, подготовка педагогических кадров в сфере информатики, информационных технологий приобретает стратегически важное значение.

На данном этапе развития информационного общества наблюдается повышенное внимание к технологиям трехмерной графики, что обусловлено особенностями зрительного восприятия человека трехмерных объектов. Как отмечает Р. Арнхейм зрительное восприятие является восприятием пространственным. «Визуальное понятие о предмете, обладающем некоторым объемом, может быть представлено

только в трехмерной среде». [4]. В образовании трехмерная графика способствует решению широкого спектра педагогических задач, что позволяет ее отнести к инструментам перехода от традиционной модели обучения к более прогрессивной, инновационной [5]. Следовательно, будущий учитель информатики должен владеть инструментами и методами создания, обработки трехмерных изображений, что и обозначено в образовательном стандарте высшего образования первой ступени по специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика» [6]. В трехмерной графике выделяют две подкатегории: трехмерное компьютерное моделирование и трехмерную компьютерную визуализацию [7].

Цель данной статьи заключается в представлении результатов исследования, в ходе которого проанализирован накопленный в педагогической науке опыт обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации, выявлены особенности обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики в БГПУ имени М. Танка, обозначены основные направления совершенствования процесса обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики.

Основная часть

Обучение трехмерному компьютерному моделированию будущих специалистов на высшей ступени образования исследовали: Т. В. Чернякова (педагогов профессионального обучения), В. В. Корешков (специалистов в области художественной деятельности), Л. Я. Нодельман (учителей изобразительного искусства и черчения), Л. В. Иванникова (учителей технологии и предпринимательства), А. Ю. Лихачев (учителей рисования и черчения), Н. А. Саблина (дизайнеров) и др. Методике обучению трехмерному компьютерному моделированию школьников посвящены научные работы В. В. Александровой (дополнительное образование), О. А. Тарасовой (базовое и профильное среднего образования). Проблемы использования трехмерного компьютерного моделирования изучали А. И. Сторожилов (обучение решению геометрических задач студентов машиностроительных специальностей), Н. В. Фе-

дотова (графическая подготовка студентов технического вуза), Ю. В. Тихомирова (обучение геометрии в 1–6 классах) и др. Разработке методики формирования компетенции дидактической компьютерной визуализации у будущих учителей информатики посвящена диссертационная работа И. В. Баландиной. Обучение трехмерному компьютерному моделированию и визуализации на ступени высшего образования учеными исследовано в рамках: учебной дисциплины «Компьютерная графика» (И. В. Баландина, В. В. Корешков), учебной дисциплины «Компьютерное 3D моделирование» (Н. А. Саблина), учебной дисциплины «Компьютерная графика и моделирование» (Т. В. Чернякова), учебного модуля «Компьютерная графика» (Л. В. Иванникова), спецкурса «3D Studio Max» (Л. Я. Нодельман), интегрированного курса по совместному использованию двухмерной, трехмерной и комбинированной компьютерной графики (А. Ю. Лихачев), учебно-технологических кластеров «Статическая графика» и «Динамическая графика» (И. В. Баландина).

В научной литературе по теории и методике обучения информатике недостаточно отражены особенности обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации студентов, обучающихся по специальности 1-02 05 02 «Физика и информатика» (будущих учителей информатики) в БГПУ имени М. Танка: 1) содержательная разобщенность (вопросы включены в четыре учебные дисциплины предметной области «Информатика»: «Компьютерная графика и мультимедиа», «Вычислительные методы и компьютерное моделирование», «Технологии программирования и методы алгоритмизации», «Основы информационных технологии в образовании»); 2) длительная временная протяженность (вышеуказанные учебные дисциплины изучаются в первом, втором, третьем, пятом и шестом семестрах). Следует также отметить, что по данной специальности осуществляется подготовка педагогических кадров для общего среднего образования, а ее сдвоенность позволяет будущему специалисту работать как учителем информатики, так и учителем физики. Еще одна особенность заключается в том, что трехмерной компьютерной графике присущ быстрый темп смены средств и технологий, которые учитель

информатики должен освоить в достаточно сжатые сроки. В связи с этим, возрастает значимость фундаментальности подготовки педагогических кадров. Предлагается усилить математическую составляющую учебной дисциплины «Компьютерная графика и мультимедиа», добавив теоретический материал по методам и алгоритмам трехмерной графики [8].

Подготовка будущих специалистов осуществляется на основе компетентностного подхода, направленная на формирование профессиональной компетентности. Готовность к профессиональной деятельности является одним из этапов ее становления [9]. Специфика преподавания учебных дисциплин педагогам заключается в том, что, необходимо не только раскрывать содержание определенной отрасли научного знания, но и деятельность по обучению этому знанию, закономерности осуществления и принципы построения образовательного процесса [10]. Таким образом, система подготовки будущего учителя информатики в педагогическом университете должна быть направлена на формирование готовности преподавать информатику, в том числе трехмерную компьютерную графику. На данный момент времени на ступени общего среднего образования она изучается в рамках факультативного курса «Основы 3D-моделирования» (VIII–XI классы). В связи с этим, предлагается дополнить содержание еще двух учебных дисциплин «Методика преподавания информатики» и «Архитектура и программное обеспечение вычислительных систем». Целесообразно включить следующие вопросы для изучения: методика обучения трехмерной графике в рамках факультатива; сферы применения технологий трехмерного компьютерного моделирования в настоящее время и в будущем; профессии, связанные с технологиями трехмерной графики и учреждения образования Республики Беларусь, осуществляющие подготовку специалистов по данным профессиям («Методика преподавания информатики»); аппаратное и программное обеспечение трехмерного компьютерного моделирования и визуализации («Архитектура и программное обеспечение вычислительных систем»).

И. В. Роберт указывает на то, что эффективность использования возможностей ин-

формационно-коммуникационных технологий в обучении зависит от готовности педагога к применению этих возможностей в своей профессиональной деятельности [11]. Таким образом, профессиональная подготовка будущего учителя информатики должна быть направлена не только на формирование готовности преподавать, но и готовности реализовывать дидактические возможности трехмерной компьютерной графики в учебной и учебно-исследовательской деятельности учащихся. Будущий учитель информатики должен уметь разрабатывать трехмерные модели и анимации разнообразных объектов (явлений и процессов) по информатике, физике и другим учебным дисциплинам, создавать авторские электронные образовательные ресурсы с трехмерными иллюстрациями, применять дополненную реальность и 3D-печать в образовательной деятельности.

Отличительной чертой компетентностного подхода является междисциплинарный, интегративный характер образовательного результата [12]. Компетентность специалиста формируется в процессе изучения нескольких учебных дисциплин, каждая из которых представляет собой совокупность компетенций [13]. В формировании компетентности по трехмерному компьютерному моделированию и визуализации необходимо определить «вклад» каждой из шести учебных дисциплин «Компьютерная графика и мультимедиа», «Вычислительные методы и компьютерное моделирование», «Технологии программирования и методы алгоритмизации», «Основы информационных технологии в образовании», «Методика преподавания информатики», «Архитектура и программное обеспечение вычислительных систем». Вопросы трехмерного компьютерного моделирования и визуализации пройдут сквозной содержательной линией через вышеуказанные учебные дисциплины. Таким образом будет выдержана единая логика изучения понятий, выбора форм и методов обучения, разработки учебно-методического обеспечения, что придаст системный и целостный характер процессу обучения трехмерной компьютерной графике будущих учителей информатики. Сущность идеи, механизм реализации сквозной содержательной линии раскрыты в работах А. С. Захарова, А. А. Кузнецова,

М. В. Рыжовой и др. Ориентированность образования на формирование компетенций как результатов обучения определяет целесообразность междисциплинарного обучения. Так, В. В. Гриншкун, Ы. И. Бидайбеков указывают на необходимость изучения учебных дисциплин не в отдельности и последовательно, а на основе междисциплинарного подхода, предварительно выявив общие аспекты и характеристики в каждой из дисциплин единой системы подготовки [8]. Для реализации междисциплинарности в обучении трехмерному компьютерному моделированию и визуализации предлагается предусмотреть выполнение практико-ориентированных междисциплинарных учебных проектов в рамках учебных дисциплин трех предметных областей «Информатика», «Физика» и «Математика».

Заключение

На основе анализа существующей системы преподавания трехмерной графики, были выявлены особенности обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики в БГПУ имени М. Танка, которые не в полной мере раскрыты в теории и методике обучения информатике. Что актуализирует разработку методической системы междисциплинарного обучения трехмерному компьютерному моделированию и визуализации будущих учителей информатики, которая позволит обеспечить фундаментальность подготовки, формирование готовности преподавать и применять будущими учителями информатики трехмерное компьютерное моделирование и визуализацию в профессиональной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Национальная** стратегия устойчивого социально-экономического Республики Беларусь на период до 2030 года // Экономический бюллетень Научно-исследовательского экономического института Министерства экономики Республики Беларусь. – № 4 (214). – 2015.
2. **Вабищевич, С. В.** Концептуальные основания разработки информационно-образовательных ресурсов методической подготовки учителя информатики / С. В. Вабищевич, И. И. Цыркун // Весті БДПУ. Серія 3. Фізика. Математика. Інформатика. Біологія. Географія. – 2014. – № 2. – С. 53–56.
3. **Крестников, В. С.** Роль учителя информатики в формировании информационно-образовательной среды школы / В. С. Крестников // Вестник МГПУ. Серия «Информатика и информатизация образования». – 2009. – № 17. – С. 146–147.
4. **Арнхейм, Р.** Искусство и визуальное восприятие / Сокр. пер. с англ. В. Н. Самохина. Общ. ред. и вступит. статья В. П. Шестакова. – М.: Прогресс, 1974. – 392 с.
5. **Дробязкин, Р. С.** Преимущества использования 3D моделирования в образовании / Р. С. Дробязкин, О. С. Бурякова // Вестник современных исследований. – 2017. – № 10–1(13). – С. 66–70.
6. **1-02 05 02-2013** Высшее образование. Первая ступень = Вышэйшая адукацыя. Першая ступень: Спецыяльнасць 1-02 05 02 Фізіка і інфарматыка; Кваліфікацыя Прэпадavatель: адукацыйны стандарт выш. адукацыі / разрабтан БГПУ. – утв. і введ. 2013–08–30. – Мн.: – Міністэрства адукацыі РБ, 2013. – 27 с.
7. **Сабліна, Н. В.** Развитие художественно-творческой активности студентов-дизайнеров средствами компьютерного 3D моделирования: дис. – канд. пед. наук: 13.00.08 / Н. В. Сабліна. – М., 2015. – 163 л.
8. **Бидайбеков, Е. Ы, Гриншкун, В. В.** Особенности обучения педагогов компьютерной графике в условиях фундаментализации образования / Е. Ы. Бидайбеков, В. В. Гриншкун // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2017. – № 2. – С. 103–109.
9. **Маркова, А. К.** Психология профессионализма / А. К. Маркова. – М., 1996. – 308 с.
10. **Рыжова, Н. И.** Развитие методической системы фундаментальной подготовки будущих учителей информатики в предметной области: дис. – докт. пед. наук: 13.00.02 / Н. И. Рыжова. – СПб., 2000. – 429 л.
11. **Роберт, И. В.** Теория и методика информатизации образования (психологопедагогический и технологический аспекты) / И. В. Роберт. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 398 с.
12. **Копосова, Е. Г.** Междисциплинарный подход в обучении математике студентов бакалавриата (на примере химических направлений подготовки): дис. – канд. пед. наук: 13.00.08 / Е. Г. Копосова. – СПб., 2010. – 195 л.
13. **Тонкович, И. Н.** Формирование модели учебной дисциплины в рамках компетентностного подхода / И. Н. Тонкович // Инновационные образовательные технологии. – 2012. – № 12. – С. 40–44.

REFERENCES

1. **National** Strategy for a Sustainable Social and Economic Republic of Belarus for the Period up to 2030 // Economic Bulletin of the Research Economic Institute of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus. – № 4 (214). – 2015.
2. **Vabishchevich, S. V.** Conceptual basis for the development of information and educational resources for methodical training of a computer science teacher / S. V. Vabishchevich, I. I. Tsyrcun // Vestsi BDPU. Series 3. Physics. Mathematics. Informatics. Biology. Geography. – 2014. – № 2. – p. 53–56.

3. **Krestnikov, V. S.** The role of the teacher of computer science in the formation of the information-educational environment of the school / V. S. Krestnikov // Vestnik MGPU. Series «Informatics and informatization of education». – 2009. – № 17. – p. 146–147.
4. **Arnheim, R.** Art and visual perception / Abbr. per. from English V. N. Samokhin. Total ed. and enter. article V. P. Shestakova. – M.: Progress, 1974. – 392 p.
5. **Drobyazkin, R. S.** The advantages of using 3D modeling in education / R. S. Drobyazkin, O. S. Buryakova // Herald of contemporary research. – 2017. – № 10–1 (13). – p. 66–70.
6. **1-02 05 02-2013** Higher education. First stage = Highest adukatsyya. The first stage: Specialty 1–02 05 02 Physics and Informatics; Qualification Instructor: educational standard of higher. Education / developed by BSPU. – approved. and enter 2013-08-30. – Mn.: – Ministry of Education of the Republic of Belarus, 2013. – 27 p.
7. **Sablina, N. V.** The development of artistic and creative activity of students-designers by means of computer 3D-modeling: dis.... cand. ped. sciences: 13.00.08 / N. V. Sablina. – M., 2015. – 163 p.
8. **Bidaybekov, E. Y., Grinshkun, V. V.** Features of teaching computer graphics teachers in the context of education fundamentalization / E. Y. Bidaybekov, V. V. Grinshkun // Modern information technologies and IT-education. – 2017. – № 2. – p. 103–109.
9. **Markova, A. K.** Psychology of professionalism / A. K. Markova. – M., 1996. – 308 p.
10. **Ryzhova, N. I.** The development of the methodological system of fundamental training of future teachers of computer science in the subject area: dis.... dr. ped. sciences: 13.00.02 / N. I. Ryzhova. – SPb., 2000. – 429 l.
11. **Robert, I. V.** Theory and methods of education informatization (psychological, pedagogical and technological aspects) / I. V. Robert. – M.: BINOM. Knowledge Lab, 2014. – 398 p.
12. **Koposova, E. G.** Interdisciplinary approach to teaching mathematics undergraduate students (for example, the chemical areas of training): dis.... cand. ped. sciences: 13.00.08 / E. G. Koposova. – SPb., 2010. – 195 l.
13. **Tonkovich, I. N.** Formation of a model of academic discipline in the framework of the competence-based approach Tonkovich // Innovative educational technologies. – 2012. – № 12. – p. 40–44.

Поступила
19.06.2018

После доработки
05.10.2018

Принята к печати
30.11.2018

O. G. Rylova

FEATURES OF TRAINING 3D COMPUTER MODELING AND VISUALIZATION OF FUTURE TEACHERS OF INFORMATICS

The cognitive, developing, illustrative potential of three-dimensional computer graphics actualizes the training of future teachers in its technologies. The future teacher of computer science should be able to develop three-dimensional models and animations of the studied objects (phenomena and processes) in computer science, physics, mathematics and other academic disciplines, create copyright electronic educational resources with three-dimensional illustrations, apply augmented reality and 3D printing in professional activities.

The article describes the features of teaching three-dimensional computer modeling and visualization of future informatics teachers, identified on the basis of an analysis of the training system for students studying in specialty 1–02 05 02 Physics and Informatics at the Maxim Tank Belarusian State Pedagogical University.

The main directions for improving the learning process of three-dimensional computer graphics of future informatics teachers are indicated. Questions on three-dimensional computer modeling and visualization will pass through the content line through the content of six academic disciplines («Computer graphics and multimedia», «Computational methods and computer modeling», «Programming Technologies and Algorithmization Methods», «Information Technologies in Education», «Methods teaching informatics» and «Architecture and software of computer systems»). This will ensure consistency in the introduction and study of concepts, the choice of forms and methods of teaching, the development of teaching and methodical support. For the implementation of interdisciplinarity, it is proposed to carry out practice-oriented interdisciplinary educational projects in the framework of the study of academic disciplines in three subject areas «Computer Science», «Physics» and «Mathematics». The development of a methodical system of interdisciplinary education will ensure the formation of readiness to teach three-dimensional graphics at the stage of general secondary education and to realize its didactic possibilities in organizing educational and research activities of students.

Keywords: future teacher of computer science, readiness for professional activity, interdisciplinary approach, three-dimensional graphics, three-dimensional computer modeling, three-dimensional computer visualization.



Рылова Оксана Геннадьевна аспирант кафедры «Информатика и методика обучения информатике» Белорусского государственного педагогического университета имени Максима Танка, специальность 13.00.02 – Теория и методика обучения и воспитания (информатика).

Oksana Rylova is a graduate student of the department «Informatics and methods of teaching informatics» of the Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, specialty 13.00.02 – Theory and methods of training and education (computer science).