

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**
№ 1, 2021



**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**
No 1, 2021

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

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National
Technical University

Editor-in-chief

Sergei V. Kharytonchyk

Editorial board

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

Ответственный секретарь редакции

Сатиков И. А.

Технический редактор

Хвитько Е. А.

Адрес редакции

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск, 220114,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

I. Satikov

Technical Editor

E. Khvitsko

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 266-26-58
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 .04.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 9,07. Уч.-изд. л. 5,4. Тираж 50 экз. Заказ

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**Гансецкий Д. В.**

Автоматизированный струнный робототехнический комплекс как перспективный метод мониторинга безопасности объектов и участков государственной границы 4

Легкоступ В. В., Маркевич В. Э.

Уравнения кинематики беспилотного летательного аппарата в эллиптической системе координат при наведении по разностно-дальномерной навигационной информации..... 12

Лобатый А. А., Бумай А. Ю., Прохорович С. С.

Поэтапный аналитический синтез математической модели автопилота беспилотного летательного аппарата 21

Михайлов В. Г.

Передача данных с simulink на 6-dof виброплатформу по can bus 29

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**Вишняков В. А., Аль-Масри А. Х., Аль-Хаджи С. К.**

Модель и структура сети интернет вещей для мониторинга качества молока 39

Жук А. А., Булойчик В. М.

Нейросетевой метод решения нелинейной задачи оптимального распределения неоднородного ресурса 45

Кечик Д. А., Асламов Ю. П., Давыдов И. Г.

Метод оценки изменения частоты, основанный на оценке смещения спектральных пиков..... 53

Ма Ц., Цветков В. Ю., Конопелько В. К.

Двухшаговая скелетизация бинарных изображений на основе модели занга-суена и порождающей маски ... 62

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**Петухов А. В.**

Внедрение интегрированных систем проектирования в учебный процесс 71

CONTENTS

MANAGEMENT OF TECHNICAL
OBJECTS**Hansetski D. V.**

Automated stringed robotechnical complex as a prospective method for monitoring of objects' safety and state border areas 4

Legkostup V. V., Markevich V. E.

Methodology of determining of the transfer function of engagement kinematics of accelerations of an aircraft and its elliptic coordinates used for the guidance based on time difference of arrival 12

Lobaty A. A., Bumai A. Y., Prohorovith S. S.

Step-by-step analytical synthesis of the mathematical model of automotive unmanned aircraft 21

Mikhailov V. G.

Data transmission with simulink on 6-dof platform on can bus 29

DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**Vishniakou U. A., Al-Masri, A. H., Al-Haji, S. K.**

Model and structure of the network internet of things for monitoring milk quality 39

Zhuk A. A., Buloichyk V. M.

Neural network method of the decision of the nonlinear problem of optimum distribution of the non-uniform resource 45

Kechik D. A., Aslamov Y. P., Davydov I. G.

Method of estimation of frequency variation relying on estimation of shift of spectral peaks..... 53

Ma J., Tsviatkou V. Yu., Kanapelka V. K.

Two-step skeletization of binary images based on the zhang-suen model and the producing mask 62

INFORMATION TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**Petukhov A. V.**

Implementation of integrated design systems in the learning process 71

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

Д. В. ГАНСЕЦКИЙ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СТРУННЫЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ И УЧАСТКОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ

Государственное учреждение образования «Институт пограничной службы Республики Беларусь»

Анонсируется инновационный проект по созданию опытного образца многофункционального мобильного автоматизированного струнного робототехнического комплекса. Отличительная особенность проекта – мобильность в передислокации и максимальное использование искусственного интеллекта для решения задач по обеспечению безопасности охраняемого объекта или территории.

Введение

Во все времена безопасность любой страны и каждого государства, в первую очередь начиналась с границы. Как показало время, в XXI веке это не стало исключением, а приобрело еще больший смысл, актуальность и востребованность. Происходящие процессы в мире, связанные с такими угрозами как международный терроризм, наркотрафик, торговля людьми и незаконная миграция, заставляют многие государства осуществлять контроль на своих границах.

В Республике Беларусь охране Государственной границы уделяется особое внимание, как одной из первостепенных и приоритетных задач в обеспечении пограничной безопасности и безопасности страны в целом. Основу обеспечения надежной охраны границы составляет инженерное оборудование с оснащением участков границы техническими средствами охраны (ТСО), которые показывают свою высокую эффективность и надежность в обнаружении нарушителей и признаков нарушения границы, позволяют осуществлять контроль на сложных и труднодоступных участках границы, помогают пограничному наряду действовать на упреждение нарушения [1, 2].

Вместе с тем, основными актуальными проблемами в ТСО являются заблаговременное распознавание типа нарушителя

и способность отслеживания направления его движения.

В связи с изложенным, возникает необходимость создания качественных и современных интеллектуальных средств охраны (ИСО), отличительной особенностью которых будет [2]:

- непрерывный контроль за целостностью рубежа охраны;
- мобильность и точность определения конкретного места (участка) нарушения;
- возможность определения (распознавания) типа нарушителя;
- минимизация количества ложных тревог;
- возможность модернизации и совместимость работы с иными типами ИСО.

Сегодня на мировом рынке представлены разнообразные типы ИСО, однако многие из них по определенным конструктивным и технологическим особенностям не могут решать ряд вышеописанных задач либо решают их частично [2].

В данной статье автором представлен отечественный инновационный проект по созданию, разработке и методике применения современного ИСО – многофункционального автоматизированного струнного робототехнического комплекса (АСРК), отличительной особенностью которого, будет решение вышеописанных задач с использованием

искусственного интеллекта, нейросетевых технологий и мобильности в передислокации для точности определения конкретного места (участка) нарушения и распознавания типа нарушителя [2]. Также в данной статье описан принцип работы АСРК и представлена концепция управления данным робототехническим комплексом.

Автоматизированный струнный робототехнический комплекс

Автоматизированный струнный робототехнический комплекс – это автоматизированное ИСО, предназначенное для патрулирования и охраны периметров особо важных объектов, сухопутных и водных участков границы и прибрежных акваторий. Также АСРК можно будет применять для охраны трубопроводов, заповедников, контроля движения по автомобильным и железным дорогам. Основу АСРК составляет мобильный робототехнический комплекс.

АСРК представляет собой мобильный робототехнический комплекс в виде передвижного модуля, оснащенного системой видеонаблюдения, тепловизором и переговорным устройством. Передвижной модуль может перемещаться в пространстве по натянутой рельсе-струне (монорельсу).

В комплект (состав) АСРК будут входить [2]:

- передвижной модуль, оснащенный системой видеонаблюдения, тепловизором и переговорным устройством;

- линейная часть, представленная чувствительным элементом в виде волоконно-оптического кабель-датчика, оптических муфт и волоконно-оптического кабеля связи;

- станционное оборудование, предназначенное для контроля, обработки, распознавания и отображения информации, полученной с системы видеонаблюдения, тепловизора и чувствительного элемента, а также для тестирования (проверки) работоспособности отдельных узлов и компонентов АСРК;

- зарядная станция – для зарядки аккумуляторной батареи (АКБ) передвижного модуля.

Общий вид АСРК представлен на рис. 1.

Система видеонаблюдения передвижного модуля АСРК будет представлена купольной поворотной роботизированной PTZ-видеокамерой с инфракрасной подсветкой, скоростным электроприводом (приводом, непрерывно поворачивающим камеру на 360 градусов вокруг своей оси, а также вверх и вниз относительно поверхности земли) и умными технологиями автоматизированного управления и реагирования.

В целях контроля за прилегающей местностью в периоды сложных погодных условий – снег, дождь, туман, песчаная буря и т.п., АСРК должен быть оснащен камерой тепловизионного наблюдения – тепловизором, с длиннофокусной оптикой, высоким разрешением матрицы и скоростным электроприводом, для

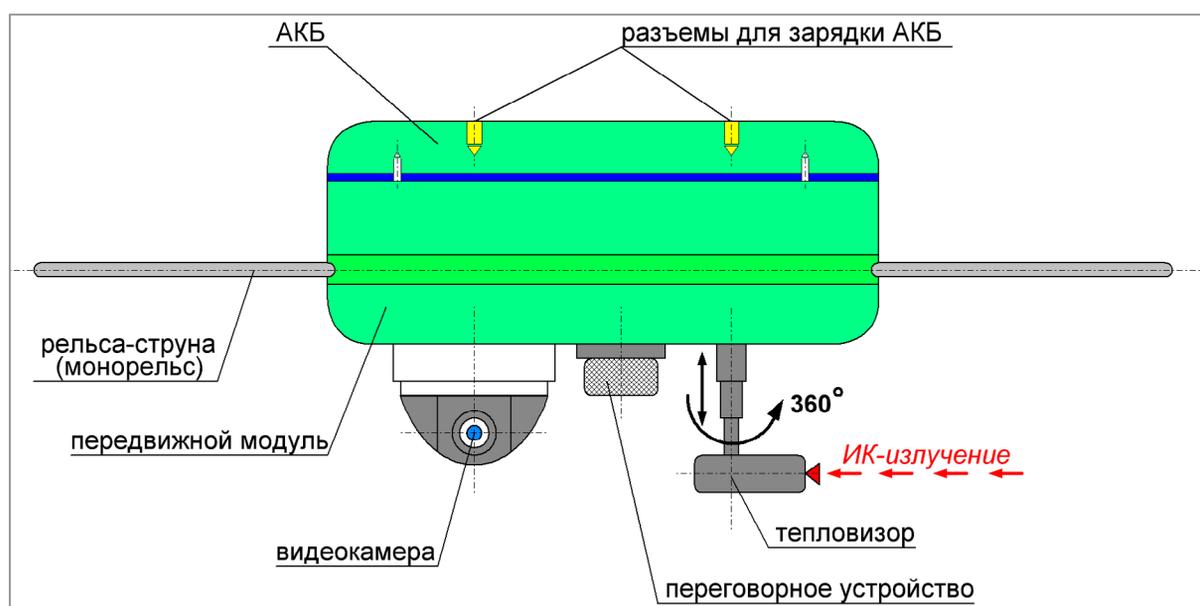


Рис. 1. Общий вид АСРК

непрерывного поворота тепловизора вокруг своей оси на 360 градусов и его передвижения в вертикальной плоскости (рис.1).

Переговорное устройство будет представлено динамиком для предупреждения и остановки нарушителя, а также осуществления двустороннего диалога.

Для осуществления передвижения по рельсу-струне (монорельсу) модуль необходимо оснастить шасси с автоматизированным электроприводом и источником питания.

В целях создания устойчивого положения конструкции при ветровых нагрузках, шасси АСРК представлено двухколесной полноприводной системой с автоматизированным электроприводом – оба колеса оснащены вентильными электродвигателями постоянного тока, которые работают по принципу «мотор-колесо» (рис.2). Реализация автоматизированного электропривода на вентильных электродвигателях постоянного тока позволит сделать корпус передвижного модуля АСРК более компактным, избавиться от дополнительных деталей, лишних преобразователей, а соответственно сделать весь привод механизма более надежным [3].

Также к достоинствам электроприводов на вентильных двигателях можно отнести: небольшие потери энергии, благодаря малому магнитному сопротивлению; высокую безопасность при работе на максимальных нагрузках; широкий интервал рабочих скоростей; высокую точность работы и динамику; плавное

переключение скоростей; отсутствие щеточно-коллекторного узла; возможность применения в агрессивной среде; более длительные сроки службы [3].

Источником питания для передвижного модуля АСРК выступает литий-ионная аккумуляторная батарея, которая является более оптимальной в плане электрохимических показателей – высокая энергоемкость, низкие саморазряды, внушительный набор циклов зарядов и разрядов.

Чувствительный элемент АСРК будет представлять собой волоконно-оптический кабель-датчик (ВОКД), разбитый с помощью оптических муфт (ОМ 1, ОМ 2, ..., ОМ n) на зоны охраны протяженностью от 100 до 500 м – для точности определения конкретного места (участка) нарушения (рис. 3). ВОКД, который является датчиком вибрационного типа, обычно монтируется на линейное ограждение охраняемого объекта либо территории.

В состав стационарного оборудования будут входить (рис. 3): автоматический блок контроля функционирования системы (БКФС); блок приёма-передачи сигнала (БППС), в котором будут находиться блок оптического передатчика (БОП) и блок фотоприемников (БФП) – оптический приёмник; блок обработки, распознавания и отображения сигналов (БОРОС), состоящий из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), перестраиваемого полосового фильтра (ППФ)

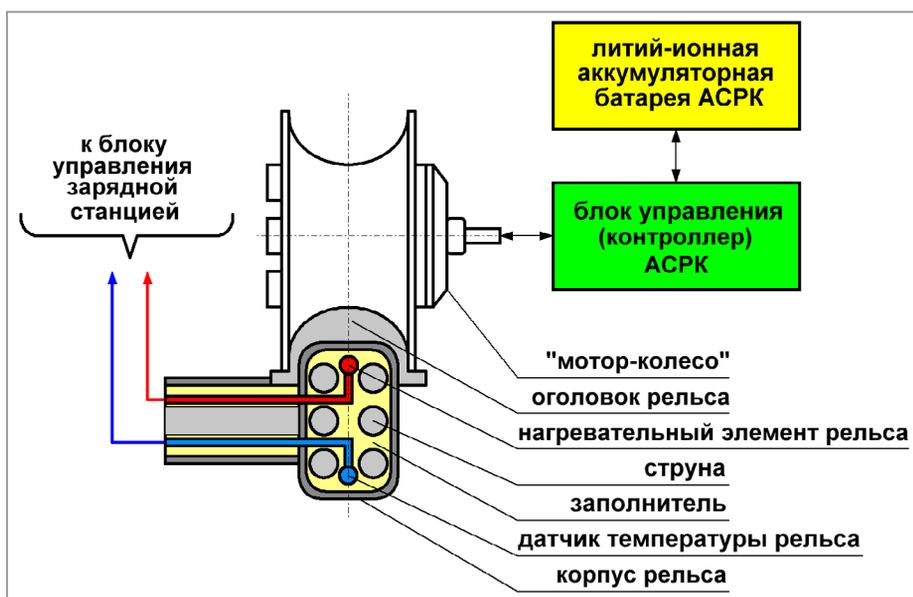


Рисунок 2 – Конструкция шасси АСРК и монорельса

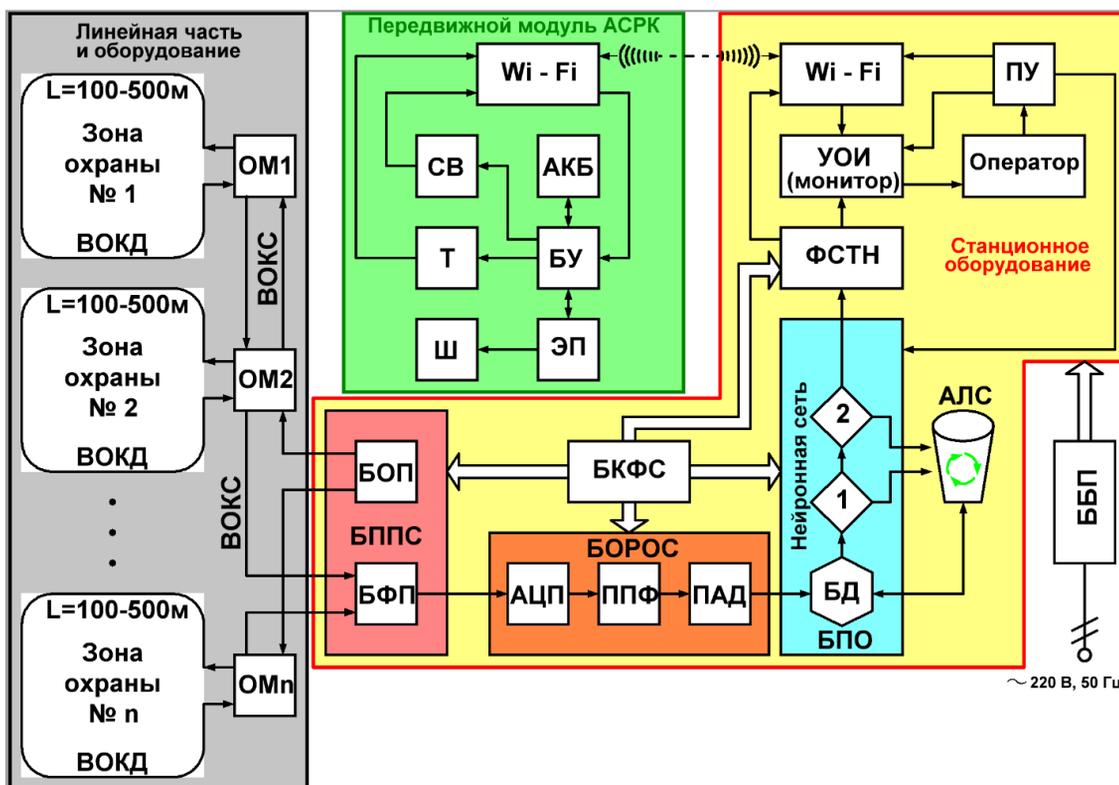


Рисунок 3 – Функциональная схема АСРК

и многопараметрического анализатора входных данных (ПАД); блок программного обеспечения (БПО), состоящий из базы данных (БД) и нейронной сети (блоки 1 и 2); архив ложных сигналов (АЛС); формирователь сигналов тревоги и неисправности (ФСТН); устройство отображения информации (УОИ) – монитор; пульт управления (ПУ) – клавиатура; блок бесперебойного питания (ББП); блок Wi-Fi, для беспроводной связи, дистанционного контроля и управления передвижным модулем АСРК, а также получения информации в режиме реального времени с системы видеонаблюдения (СВ) и тепловизора (Т) передвижного модуля АСРК [5, 6].

Зарядная станция АСРК (рис. 4) представлена автономной системой электропитания, которая осуществляет преобразование кинетической энергии ветра и световой энергии солнца в электрическую с возможностью дальнейшего накопления в блоке АКБ зарядной станции и непрерывного электроснабжения узлов и компонентов АСРК, а именно – электроснабжение электропривода (ЭП) устройства захвата АКБ передвижного модуля и её зарядки путем соединения через специальные разъёмы (рис. 1) и обогрев рельса-струны (монорельса) в случае его оледенения при низких температурах (рис. 2).

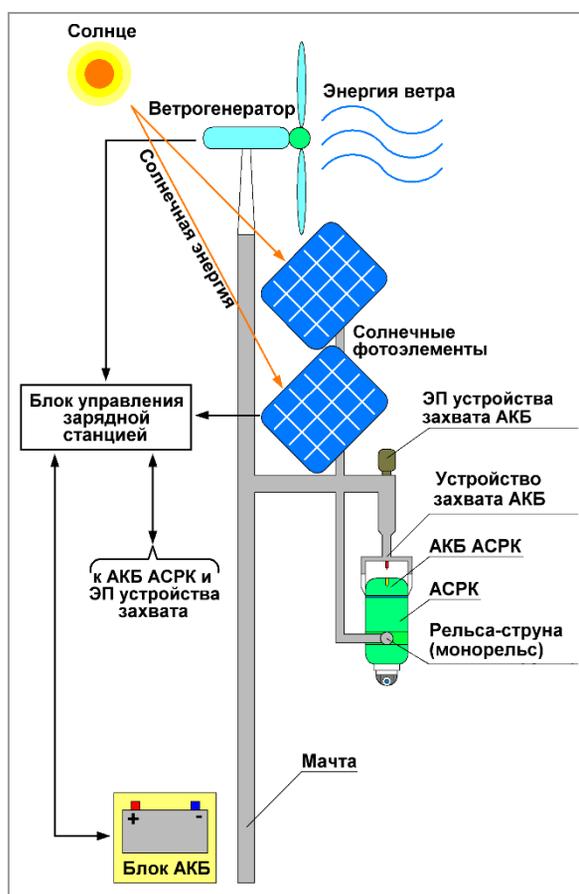


Рисунок 4 – Зарядная станция АСРК

Принцип работы и концепция управления АСРК

Принцип работы АСРК будет заключаться в передвижении модуля вдоль рубежа охраны по рельсу-струне (монорельсу) и в мониторинге местности, прилегающей к рубежу охраны системой видеонаблюдения и тепловизором, с передачей полученных данных в пункт постоянной дислокации подразделения границы на пост оператора (дежурного) в режиме реального времени. В случае воздействия на чувствительный элемент, через станционную аппаратуру происходит обработка сигнала, и модуль немедленно передвигается к месту (участку) нарушения, где с помощью системы видеонаблюдения и тепловизора, осуществляется распознавание типа нарушителя [2, 4].

Более детально принцип работы и концепцию управления АСРК рассмотрим с помощью функциональной схемы АСРК, представленной на рис. 3. На рис.5 представлен рубеж охраны, оснащенный АСРК.

На каждом участке охраны волоконно-оптический кабель-датчик (ВОКД) (рис. 3) с помощью оптических муфт (ОМ 1, ОМ 2, ..., ОМ n) разбит на зоны охраны и смонтирован на заграждении рубежа охраны (рис. 5). Блок оптического передатчика (БОП) формирует синусоидальные световые сигналы в инфракрасном диапазоне, которые по многожильному волоконно-оптическому кабелю связи (ВОКС), через оптические муфты (ОМ),

поступают в ВОКД. При попытке преодоления заграждения, оно начинает деформироваться и создавать вибрации, которые в свою очередь передаются на ВОКД, а поскольку структура световой волны в оптическом волокне восприимчива к внешним воздействиям, то происходит искажение светового потока и меняются параметры оптического сигнала, прошедшего через ВОКД на блок фотоприемников (БФП). Изменившийся оптический сигнал преобразуется на БФП в электрический сигнал и оцифровывается на аналого-цифровом преобразователе (АЦП). Далее сигнал фильтруется в перестраиваемом полосовом фильтре (ППФ), где осуществляется подавление нежелательных помех и поступает в многопараметрический анализатор входных данных (ПАД). Далее измеренные параметры обрабатываются в блоке программного обеспечения (БПО). С использованием базы данных (БД) и алгоритмов нейронной сети (блоки 1 и 2), происходит обработка и вычисление амплитуды поступившего сигнала. Далее обработанный сигнал поступает в формирователь сигналов тревоги и неисправности (ФСТН), который формирует звуковой сигнал «Тревога!» и отображает его на мониторе с указанием номера зоны охраны, где и происходит нарушение [7, 8]. Одновременно с этим, сигнал «Тревога!», через блоки Wi-Fi, передается на блок управления (БУ) передвижного модуля АСРК, который с помощью шасси (Ш) осуществляет передвижение

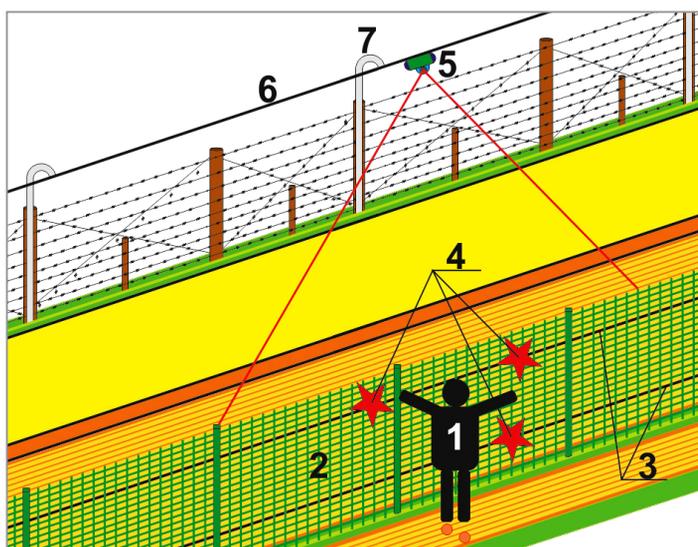


Рисунок 5 – Рубеж охраны границы, оснащенный АСРК:

1 – нарушитель; 2 – заграждение из сетки сварной; 3 – ВОКД; 4 – точки воздействия на заграждение и ВОКД; 5 – передвижной модуль АСРК; 6 – рельса-струна; 7 – опора рельса-струны

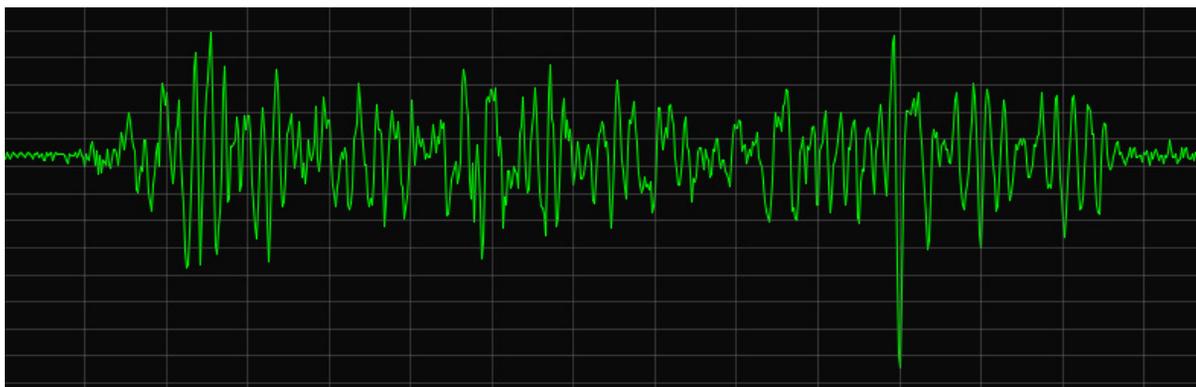


Рисунок 6 – Амплитуда сигнала при воздействии человека-нарушителя на заграждение

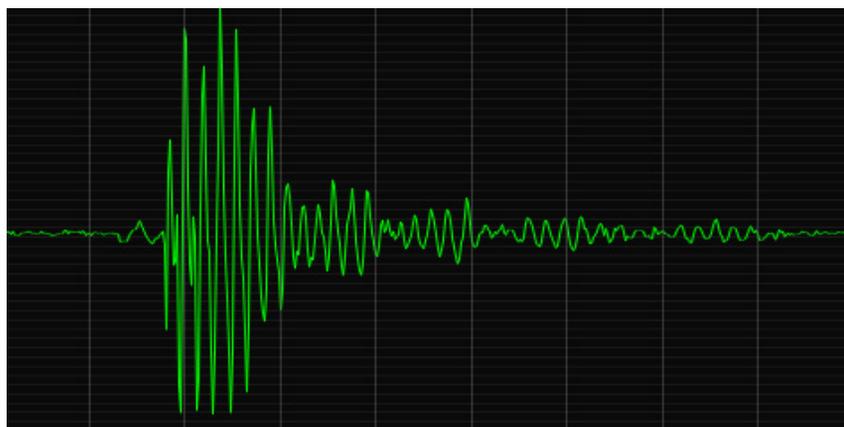


Рисунок 7 – Амплитуда сигнала при воздействии животного на заграждение

(передислокацию), в зону охраны, где происходит нарушение, для распознавания и определения типа нарушителя.

Применение нежестких нейросетевых алгоритмов (искусственного интеллекта) позволяет методом обучения классифицировать сигналы тревог на «ложные» – поступившие от воздействия на заграждение животными (кабан, лось, олень, собака, птица и т.д.) либо погодными условиями (порывистый ветер, крупный град, и т.д.), и «Тревога!» – поступившие от воздействия на заграждение человека либо техники.

В процессе эксплуатации системы АСРК, алгоритмы можно дообучать на те, или иные решения, исходя из конкретных условий применения. Обучение нейронных сетей математически выражается в подборе некоторых весовых коэффициентов нейронной структуры, при которых она с максимальной точностью разделяет примеры «ложных» сигналов от примеров сигналов «Тревога!». Процесс обучения состоит в создании в БПО компьютера БД с амплитудами «ложных» сигналов и сигналов «Тревога!», которые будут обрабатываться,

вычисляться и сравниваться в блоках 1 и 2. Если сигнал окажется не ложным, то программа сформирует сигнал «Тревога!», а если сигнал окажется «ложным», то он программой автоматически отфильтруется и сохранится в архиве ложных сигналов (АЛС) с последующей записью в БД.

Пример, когда программа безошибочно определила сигнал «Тревога!» от воздействия вторжения человека-нарушителя и отнесла его в список «Тревоги», а также отфильтровала «ложный» сигнал от воздействия животного, представлен на рисунках 6 и 7 соответственно.

Передвижной модуль АСРК работает в автоматическом режиме, но в случае необходимости может быть переведен на ручное управление оператором (дежурным).

Методика применения АСРК

Применять АСРК более всего рационально на направлениях вероятного движения нарушителей границы, на направлениях контрбандной деятельности и для прикрытия флангов пункта пропуска. Это позволит: в режиме

реального времени осуществлять дистанционный контроль за прилегающей местностью к государственной границе; повысить надёжность охраны границы и вероятность обнаружения нарушителей; перейти от охраны государственной границы подвижными пограничными нарядами к реагированию на изменения обстановки; прикрывать отдельно взятое направление либо участок в ходе проведения поисковых мероприятий; собрать неопровержимые доказательства попытки нарушения государственной границы [2, 4].

Заключение

В работе рассмотрен проект интеллектуального средства охраны – автоматизированного струнного робототехнического комплекса. Произведено его подробное описание, изложен принцип работы и концепция управления. Новизна разрабатываемого робототехнического комплекса заключается в выборе нестандартной оптимизированной конструкции корпуса и ходовой части, мобильности при передислокации (передвижении) и максимальное использование искусственного интеллекта для решения задач по обеспечению безопасности охраняемого объекта или территории. Для придания комплексу свойств интеллектуальности, поставлена задача разработки методов, алгоритмов и программных средств

распознавания ситуаций на границе посредством нейронных сетей и других технологий искусственного интеллекта. В связи с применением технологий искусственного интеллекта стоит задача выбора наиболее оптимальных типов (видов) нейронных сетей, их обучение и проведение дальнейших исследований в целях синтеза, обработки и получения информации для оптимального управления комплексом в целом. Основным недостатком АСРК при охране участка границы, будет являться малая протяженность охраняемого участка, примерно 1–1,5 км, так как нерационально его использовать в охране всего участка подразделения границы, протяженность которого может составлять от 15 до 30 км. При использовании АСРК на больших расстояниях, передвижной модуль просто не успеет своевременно передислоцироваться к месту нарушения и зафиксировать нарушителя. Вместе с тем, для охраны протяженного участка границы, могут использоваться несколько передвижных модулей АСРК. В целях охраны участков границы с неблагоприятным радиационным фоном, АСРК может быть дополнительно оснащен прибором контроля радиационной обстановки и найти широкое применение на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Черноволова, А.** РЕПОРТАЖ: В режиме реального времени: как умные технологии помогают пограничникам в охране рубежей [Электронный ресурс] / А. Черноволова. – 2021. – Режим доступа: <https://www.belta.by>. – Дата доступа 08.01.2021.
2. **Гансецкий, Д. В.** Автоматизированный струнный робототехнический комплекс как прообраз интеллектуальной системы охраны границы / Д. В. Гансецкий // Современные технологии обеспечения пограничной безопасности: материалы науч.-практ. конф., Минск, 29 ноября 2018 г.: в 2 ч. / ГУО «ИПС РБ»; редкол.: О. Г. Машаров [и др.]. – Минск, 2019. – Ч. 1. – С. 28–31.
3. **Гансецкий, Д. В.** Электроприводы мобильных робототехнических комплексов / Д. В. Гансецкий // Информационные технологии в образовании, науке и производстве: материалы VII междунар. науч.-техн. интернет-конференции, Минск 16 ноября 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2019. – С. 193–200.
4. **Гансецкий, Д. В.** Тактика применения автоматизированного струнного робототехнического комплекса в охране границы / Д. В. Гансецкий // Перспективы развития тактики, инженерного, технического и тылового обеспечения современного боя (к 75-летию начала Великой Отечественной войны): материалы 69-й респуб. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, адъюнктов и аспирантов военно-технического факультета в Белорусском национальном техническом университете, Минск, 25 мая 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 125–127.
5. Волоконно-оптические периметровые средства обнаружения «ВОРОН». Построение системы защиты периметра на их основе [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: <https://www.prf-vozon.ru/index.php/produktsiya>. – Дата доступа 06.10.2020.
6. Извещатель охранный линейный волоконно-оптический ИО 212–2 «ВОРОН-2М–С» // Руководство по эксплуатации. – Москва, 2004.
7. **Русанов, А. Ю.** Волоконно-оптические периметровые комплексы обнаружения серии ВОРОНТМ (часть 1) / А. Ю. Русанов // Журнал «Безопасность». – 2010. – № 2. – С. 2–4.

8. **Русанов, А. Ю.** Технология ВОРОНТМ. Волоконно-оптические распределенные сенсоры для обеспечения безопасности объектов / А. Ю. Русанов // Журнал «Интеграл». – 2013. – № 3. – С. 18–22.

REFERENCES

1. **Chernovolova, A.** REPORT: In Real Time: How Smart Technologies Help Border Guards [Electronic resource] / A. Chernovolova. – 2021. – Access mode: <https://www.belta.by>. – Date of access 08.01.2021.
2. **Hansetski, D. V.** Automated stringed robotic complex as a prototype of an intelligent border guard system / D. V. Hansetski // Modern technologies for ensuring border security: scientific and practical materials. conf., Minsk, November 29, 2018: 2 hours / SEE «IBG RB»; editorial board: O. G. Masharov [et al.]. – Minsk, 2019. – Part 1. – P. 28–31.
3. **Hansetski, D. V.** Electric drives of mobile robotic complexes / D. V. Hansetski // Information technologies in education, science and production: materials of the VII international. scientific and technical internet conference, Minsk November 16, 2019 / Belarus. nat. tech. un-t. – Minsk, 2019. – P. 193–200.
4. **Hansetski, D. V.** Tactics of using an automated stringed robotic complex in border protection / D. V. Hansetski // Prospects for the development of tactics, engineering, technical and logistical support of modern combat (to the 75th anniversary of the beginning of the Great Patriotic War): materials of the 69th republic. scientific and technical conf. faculty, adjuncts and graduate students of the military-technical faculty at the Belarusian National Technical University, Minsk, May 25, 2016 / Belarus. nat. tech. un-t. – Minsk, 2016. – P. 125–127.
5. Fiber-optic perimeter detection means «VORON». Construction of a perimeter protection system based on them [Electronic resource]. – 2020. – Access mode: <https://www.prf-voron.ru/index.php/produktsiya>. – Date of access 06.10.2020.
6. Security line fiber-optic detector IO 212–2 «VORON-2M-S» // Operation manual. – Moscow, 2004.
7. **Rusanov, A. Yu.** Fiber-optic perimeter detection systems of the VORON-TM series (part 1) / A. Yu. Rusanov // Security magazine. – 2010. – № 2 – P. 2–4.
8. **Rusanov, A. Yu.** VORON-TM technology. Fiber-optic distributed sensors to ensure the safety of objects / A. Yu. Rusanov // Magazine «Integral». – 2013. – № 3 – P. 18–22.

Поступила
01.08.2020

После доработки
17.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

HANSETSKI D. V.

AUTOMATED STRINGED ROBOTECNICAL COMPLEX AS A PROSPECTIVE METHOD FOR MONITORING OF OBJECTS' SAFETY AND STATE BORDER AREAS

An innovative project to create a prototype of a multifunctional mobile automated stringed robotic complex is announced. A distinctive feature of the project is the mobility in relocation and the maximum use of artificial intelligence to solve problems of ensuring the security of a protected object or territory.



Гансецкий Дмитрий Валерьевич, доцент ГУО «ИПС РБ», сфера интересов: технические средства охраны границы.

Hansetski Dzmityr Valerievich, Associate Professor of the State Educational Establishment «Institute of the Border Service of the Republic of Belarus», area of interest: technical means of border protection.

E-mail: dmitry.gansetsky@yandex.ru.

В. В. ЛЕГКОСТУП, В. Э. МАРКЕВИЧ

УРАВНЕНИЯ КИНЕМАТИКИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ ПРИ НАВЕДЕНИИ ПО РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОАО «АЛЕВКУРП», Минск, Республика Беларусь

Целью данной работы была выработка методики определения динамических свойств кинематической связи между измеряемыми параметрами движения объекта управления, выраженными в криволинейной системе координат и управляющими его движением ускорениями, выраженными в декартовой системе координат. Примерами криволинейных систем координат, встречающихся на практике являются: полярная, биангулярная, бицентрическая, эллиптическая, параболическая, цилиндрическая, сферическая, эллипсоидальная системы координат. Объектом исследования была выбрана эллиптическая система координат (ЭСК), позволяющая получить весьма простые соотношения между параметрами движения беспилотного летательного аппарата (БЛА) на плоскости и разностно-дальномерной навигационной информацией, получаемой на борту от двух навигационных станций. Полученная кинематическая связь требуется для последующей задачи синтеза контура управления объектом. Также описано последовательное упрощение полученной нелинейной кинематической связи и ее линеаризация для задачи синтеза системы наведения классическими линейными методами. Основное преимущество выбора эллиптической системы координат состоит в возможности осуществлять квазиоптимальное наведение объекта управления вдоль навигационной линии положения, каковой в данном случае является гипербола, что позволит уменьшить на одну количество навигационных позиций.

Ключевые слова: эллиптическая система координат, коэффициенты Ламе, разностно-дальномерная система, навигация, кинематическая обратная связь, беспилотный летательный аппарат, БЛА.

Введение

При синтезе систем автоматического регулирования возникает задача определения аналитической связи между управляющими воздействиями, формируемыми на борту объекта управления в связанной системе координат (СК), и оцениваемыми параметрами движения в криволинейной измерительной СК. При этом одним из основных требований является возможность описания указанной кинематической связи между перечисленными параметрами движения простым и естественным образом при использовании произвольных СК. Примерами криволинейных систем координат, встречающихся на практике, являются: полярная, биангулярная, бицентрическая, эллиптическая, параболическая, цилиндрическая, сферическая, эллипсоидальная системы координат.

Так как закон преобразования между криволинейными координатами всегда носит нелинейный характер, возникает проблема приведения всех используемых в процессе управления величин к одной СК, в которой будет реализован аналитический закон управления объектом. Причем, форма представления аналитической связи, полученной в результате координатных преобразований, должна обеспечивать возможность инженерного применения указанных соотношений на практике.

Примером может служить контур управления полетом БЛА по курсу, который ориентируется в пространстве по маякам, фактически используя для навигации угловые измерения. В таком случае оказывается, что силы, действующие на БЛА (главным образом – поперечные к продольной оси планера) наиболее просто и естественно выражаются

в декартовой СК (ДСК), а именно: продольная, боковая и вертикальная составляющие силы. В то же время измерительная информация, поступающая на вход контура управления, представлена в виде разности угловых координат, что естественным образом можно отобразить некоторым углом в одной из криволинейных СК – полярной, биангулярной, сферической или цилиндрической. При этом, для синтеза оптимального закона управления объектом необходимо получить аналитическое описание связи управляющих сил и измеряемых параметров движения.

Обычно такая связь выражается посредством системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, которые впоследствии линейризуются и из которых с использованием метода замораживания коэффициентов удается получить передаточные функции данных связей для заданной области изменения параметров всей системы, которую в русскоязычной литературе по построению систем управления ракетами и летательными аппаратами также иногда называют кинематическим звеном [1, 11]. И если вопросу проектирования сил на оси полярной, сферической, цилиндрической систем координат посвящено достаточное количество литературы [2, 12], то для случая менее распространенных систем, таких как эллиптическая, параболическая и другие [3] этот вопрос в ряде важных для практики случаев вызывает затруднения.

Кинематические уравнения движение объекта в эллиптической системе координат

Общую методику получения кинематической обратной связи можно представить в следующем виде:

- определение управляющей (исполнительной) и измерительной СК, в которых управляющему воздействию и измеряемой величине соответствуют свои координатные линии (плоскостной случай) или поверхности (пространственный случай);
- определение закона преобразования одной системы координат в другую;
- вычисление матрицы Якоби и коэффициентов Ламе данного преобразования;
- определение компонент вектора скорости в криволинейном пространстве;

- определение вектора ускорений в криволинейном пространстве;
- расчет проекций управляющих воздействия, выраженных в исходной СК, на оси локального базиса криволинейной СК.

В качестве примера получения кинематической связи рассмотрим движение БЛА на плоскости, навигация которого осуществляется по измерениям разности $\Delta\tau$ времен распространения радиосигнала от двух навигационных точек Π_1 , Π_2 до БЛА (рис. 1):

$$\Delta\tau = \tau = \frac{1}{c_0}(d_0 - d_1), \quad (1)$$

где d_1, d_2 – расстояния от БЛА до двух навигационных позиций Π_1 и Π_2 соответственно.

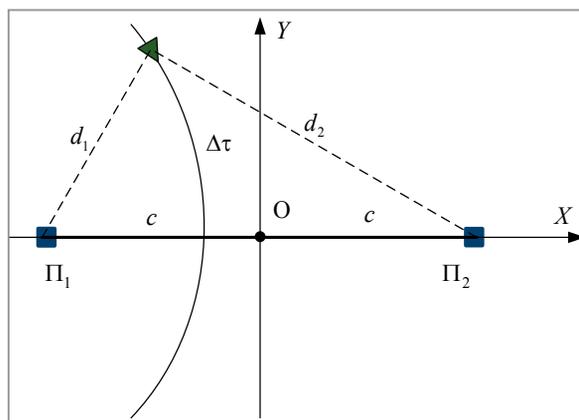


Рис. 1. Навигация БЛА в разностно-дальномерной навигационной системе

Фиксированной разности времен распространения радиосигнала $\Delta\tau = const$ соответствует линия положения в виде гиперболы. Следовательно, естественным представляется выбор такой СК, в которой данная гипербола являлся бы одной из координатных линий, описывающей местоположение БЛА. Так как вторая координата не задана, ее следует доопределить. С точки зрения точности оценки местоположения БЛА целесообразно выбрать такие две координатных линии, являющихся линиями положения БЛА, чтобы угол между ними в пределах рабочей зоны стремился к 90° . Такой линией по отношению к гиперболе будет являться эллипс. Взаимно ортогональные координатные линии в виде софокусных гипербол и эллипсов образуют так называемую эллиптическую СК [3] (рис. 2).

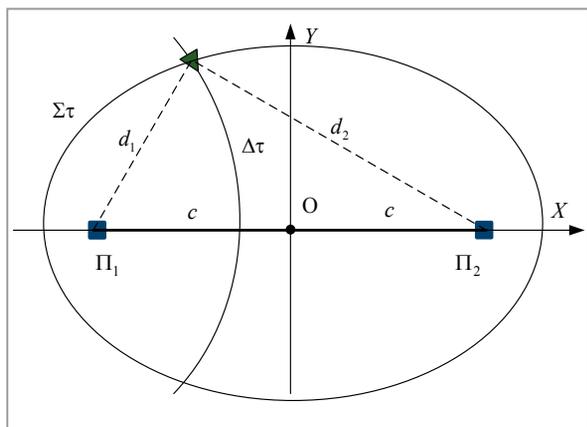


Рис. 2. Положение БЛА в эллиптической системе координат

Вторая координата $\Sigma\tau$ в выбранной системе координат (рис. 2) задает линию положения в виде эллипса, которая, по своей сути, является суммой $d_1 + d_2$ времен распространения радиосигнала от навигационных позиций Π_1 и Π_2 до БЛА.

Попытаемся установить связь между параметрами движения БЛА в эллиптической системе координат и действующими на БЛА тангенциальным W_T и нормальным W_n (по отношению к вектору скорости \mathbf{V}) ускорениями, выраженными в декартовой системе координат (рис. 3).

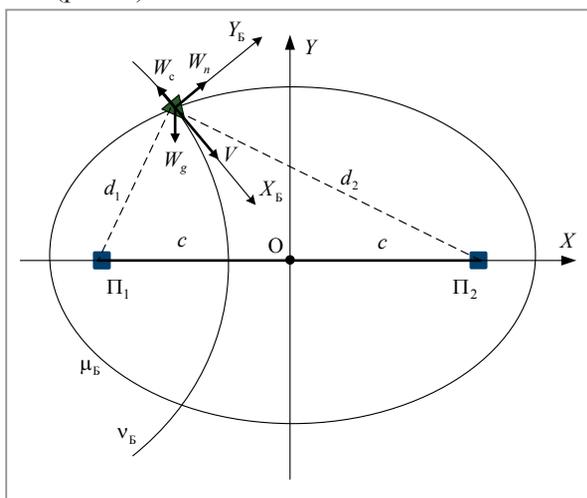


Рис. 3. Ускорения, действующие на БЛА, выраженные в декартовой системе координат

Необходимо отметить, что вектор силы или ускорения принято рассматривать как ковариантный вектор [2–5], то есть заданный через проекции на нормали к координатным поверхностям. Такие нормали образуют

локальный базис дуального пространства. В то же время координаты точки и вектор скорости принято рассматривать через контравариантные координаты, являющиеся проекциями на касательные к координатным линиям. В ортогональных системах координат, к которым относится и эллиптическая система, ковариантные и контравариантные координаты совпадают.

Результаты и их обсуждение

Известно, что декартовы координаты точки выражаются через эллиптические уравнения [3]

$$\begin{cases} x = c \cosh \mu \cos v, \\ y = c \sinh \mu \sin v, \end{cases} \quad (2)$$

где c – полубаза или фокальное расстояние; μ – относительная координата, задающая эллипс положения;

v – относительная координата, задающая гиперболу положения.

Связь между измеряемой задержкой $\Delta\tau$ и координатой v выражается нелинейным соотношением

$$\Delta\tau = \cos v. \quad (3)$$

Траектория движения БЛА вдоль одной из гипербол положения в эллиптической системе координат, соответствующей выражениям приведена на рис. 4. Штриховыми линиями обозначены эллипсы (при $\mu = \text{const}$) и гиперболы (при $v = \text{const}$) положения. Кинематика движения тела определяется уравнением Лагранжа [6, 7], которое связывает между собой контравариантные координаты q_i и скорости \dot{q}_i тела и ковариантные координаты W_i действующих ускорений:

$$\frac{1}{H_i} \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} \right) = W_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $T = V^2/2$ – кинетическая энергия материальной точки (точки единичной массы);

W_i – проекция ускорения на i -й орт локального базиса;

H_i – коэффициент Ламе, соответствующий i -му орту локального базиса;

n – количество степеней свободы.

После того, как заданы уравнения преобразования, необходимо составить матрицу Якоби и определить коэффициенты Ламе [2]. Матрица Якоби преобразования (2) имеет вид

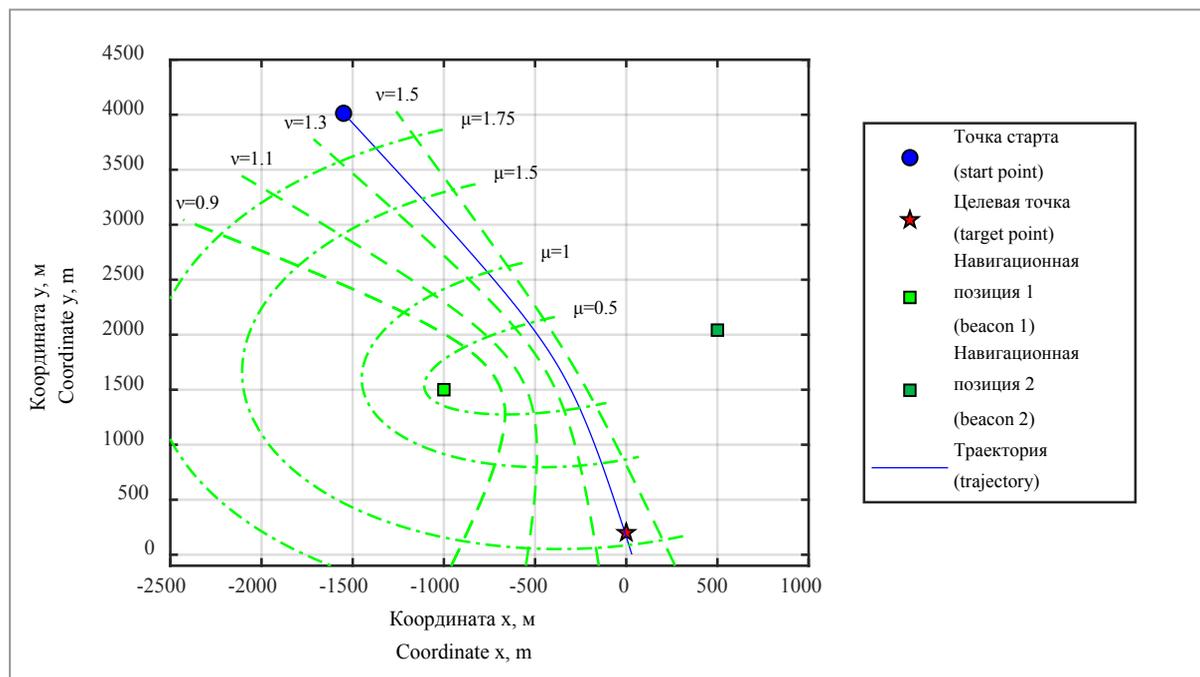


Рис. 4. Траектория движения БЛА вдоль некоторой опорной гиперболы к целевой точке в эллиптической системе координат

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \mu} & \frac{\partial x}{\partial \nu} \\ \frac{\partial y}{\partial \mu} & \frac{\partial y}{\partial \nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \operatorname{sh} \mu \cos \nu & c \operatorname{ch} \mu \sin \nu \\ -c \operatorname{ch} \mu \sin \nu & c \operatorname{sh} \mu \cos \nu \end{bmatrix} \quad (5)$$

а коэффициенты Ламе:

$$H_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \mu}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \mu}\right)^2} = \frac{c\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2\nu}}{\sqrt{2}}; \quad (6)$$

$$H_{\nu} = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial \nu}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \nu}\right)^2} = \frac{c\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2\nu}}{\sqrt{2}},$$

где H_{μ} – коэффициент Ламе, соответствующий орту \mathbf{e}_{μ} ;

H_{ν} – коэффициент Ламе, соответствующий орту \mathbf{e}_{ν} .

Из выражения видно, что коэффициенты Ламе равны между собой, а сама система координат является ортогональной, что подтверждается диагональным видом матрицы метрического тензора [8]:

$$\mathbf{g} = \mathbf{J}^T \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{c^2}{2}(\operatorname{cosh} 2\mu + \cos 2\nu) & 0 \\ 0 & \frac{c^2}{2}(\operatorname{cosh} 2\mu + \cos 2\nu) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Квадрат вектора скорости БЛА в эллиптической системе координат определяется как сумма квадратов произведений коэффициентов Ламе на соответствующие скорости

$$V^2 = (H_{\mu}\dot{\mu})^2 + (H_{\nu}\dot{\nu})^2 = \frac{c^2}{2} [\dot{\mu}^2 (\operatorname{cosh} 2\mu - \cos 2\nu) + \dot{\nu}^2 (\operatorname{cosh} 2\mu - \cos 2\nu)] \quad (8)$$

Ортогональные проекции ускорения бо-е-припаса на орты локального базиса эллиптической системы координат определяются в

соответствии с выражением (4).

Найдем частные производные от кинетической энергии точки:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \mu} &= \frac{c^2}{2} \sinh 2\mu (\dot{\mu}^2 + \dot{v}^2), & \frac{\partial T}{\partial \dot{\mu}} &= \frac{c^2}{2} \dot{\mu} (\cosh 2\mu - \cos 2v), \\ \frac{\partial T}{\partial v} &= \frac{c^2}{2} \sin 2v (\dot{\mu}^2 + \dot{v}^2), & \frac{\partial T}{\partial \dot{v}} &= \frac{c^2}{2} \dot{v} (\cosh 2\mu - \cos 2v), \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя их в выражение (4) получаем

$$\begin{aligned} W_v &= \frac{c(2\dot{\mu}\dot{v}\sin 2v + (\dot{\mu}^2 - \dot{v}^2)\operatorname{sh} 2\mu + \dot{\mu}(\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2v))}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2v}}, \\ W_\mu &= \frac{c(2\dot{\mu}\dot{v}\operatorname{sh} 2\mu + (\dot{v}^2 - \dot{\mu}^2)\sin 2v + \dot{v}(\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2v))}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu - \cos 2v}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где W_μ – проекция ускорения на орт локального базиса эллиптической системы координат, соответствующий координате μ ;

W_v – проекция ускорения на орт локального базиса эллиптической системы координат, соответствующий координате v ;

Связь проекций ускорения на орты локального базиса эллиптической системы координат, в которой рассматривается движение БЛА и проекций ускорения на оси декартовой системы (рис. 5) можно задать матричным выражением [9]

$$\begin{pmatrix} W_\mu \\ W_v \end{pmatrix} = \Phi \begin{pmatrix} W_n \\ W_T \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (12)$$

где W_n, W_T – нормальная и тангенциальная проекции ускорения БЛА;

$\alpha = \theta - \chi$ – угол между вектором скорости БЛА и ортом e_v ;

θ – угол наклона вектора скорости БЛА;

χ – угол наклона касательной к гиперболе в точке местоположения БЛА.

Для задачи навигации БЛА вдоль заданной гиперболы интерес представляет выражение для W_μ , которое является управляющим воздействием для координаты (канала управления) v_B БЛА. Однако это выражение сложно

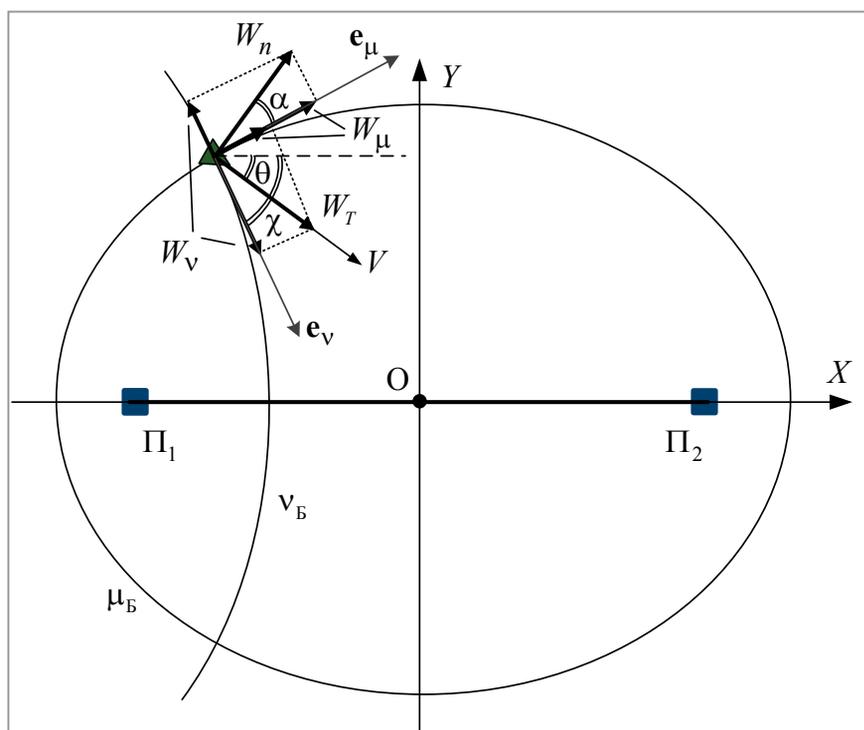


Рис. 5. Проекция ускорений, выраженных в декартовой системе координат на орты локального базиса эллиптической системы координат

поддается анализу и дальнейшему синтезу на его основе оптимального регулятора из-за наличия полиномиальных, тригонометрических и гиперболических нелинейностей, а также межканальных нелинейных связей.

Поэтому выполним упрощение данного выражения. Для задачи навигации за пределами линии базы ($\mu > 1$) можно полагать, что $\operatorname{ch} 2\mu \gg \cos 2\nu$ и, таким образом, членами с множителем $\cos 2\nu$ можно пренебречь. Тогда второе выражение в примет вид

$$W_{\mu} = \frac{c}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu}} \times (2\dot{\mu}\dot{\nu} \operatorname{sh} 2\mu + (\dot{\nu}^2 - \dot{\mu}^2) \sin 2\nu + \ddot{\nu} \operatorname{ch} 2\mu). \quad (13)$$

Кроме того, квадрат гиперболической скорости $\dot{\nu}^2$ для скоростных объектов при их движении вдоль заданной гиперболы незначителен по сравнению с квадратом эллиптической скорости $\dot{\mu}^2$, и имеет максимум при движении в районе линии базы. Исключение составляют случаи неуправляемого произвольного по отношению к навигационной системе движения, когда проекция вектора скорости БЛА на орт \mathbf{e}_{μ} сопоставима или превышает его проекцию на орт \mathbf{e}_{ν} . Пренебрегая величиной $\dot{\nu}^2$ в (13), получаем выражение

$$W_{\mu} = \frac{c}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu}} \times (2\dot{\mu}\dot{\nu} \operatorname{sh} 2\mu - \dot{\mu}^2 \sin 2\nu + \ddot{\nu} \operatorname{ch} 2\mu). \quad (14)$$

Данное выражение весьма точно описывает траекторию движения БЛА в соответствии с действующими на него ускорениями. Однако по причине присущей нелинейности вида $\sin 2\nu$ невозможно оценить приблизительный вид передаточной функции кинематической связи или синтезировать линейный контур управления, что вынуждает либо использовать методы синтеза нелинейных регуляторов, либо методы линеаризации кинематической связи (14), такие как разложение в ряд Тейлора с отбрасыванием нелинейных членов или, например, метод линеаризации обратной связью [10]. При использовании линеаризации разложением в ряд Тейлора получим следующее выражение:

$$W_{\mu} = \frac{c}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu}} \times (2\dot{\mu}\dot{\nu} \operatorname{sh} 2\mu - \dot{\mu}^2 (a_{\text{лин}} \nu + b_{\text{лин}}) + \ddot{\nu} \operatorname{ch} 2\mu), \quad (15)$$

где $a_{\text{лин}}, b_{\text{лин}}$ – коэффициенты разложения в ряд Тейлора величины $\sin 2\nu$.

Однако необходимо отметить, что выражения (14) и (15) имеют в составе слагаемое с ν , способное привести к статической ошибке в случае неточного определения величины $\dot{\mu}^2$. При синтезе методов наведения стремятся получить такую кинематическую траекторию объекта управления, которая обладала бы наименьшей кривизной с целью минимизации как динамической ошибки, возникающей при движении по кривой, так и минимальных затрат энергии на управление [11]. Поэтому наведение целесообразно осуществлять вдоль гипербола, лежащих в окрестности $\nu = \frac{\pi}{2}$, что соответствует гиперболе нулевой кривизны. В таком случае член с $\sin 2\nu$ в (14) будет близок к нулю и им можно также пренебречь. В результате получится линейное дифференциальное уравнение второго порядка по отношению к величине ν с переменными коэффициентами:

$$W_{\mu} = \frac{c}{\sqrt{2}\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu}} (2\dot{\mu}\dot{\nu} \operatorname{sh} 2\mu + \ddot{\nu} \operatorname{ch} 2\mu). \quad (16)$$

Разрешая выражение (16) относительно старшей производной получаем

$$\ddot{\nu} = \frac{\sqrt{2}}{c\sqrt{\operatorname{ch} 2\mu}} W_{\mu} - 2\dot{\mu}\dot{\nu} \operatorname{tanh} 2\mu. \quad (17)$$

Сравнительный анализ выражений (10) и (16) приведен на рис. 6. Приведенные графики показывают достаточную степень сходства исходной и упрощенной кинематических связей.

На рис. 6 представлены траектории движения БЛА вдоль гиперболы $\nu_0 = 1.5$ в направлении линии базы со скоростью 100 м/с ($\dot{\mu} = 0,03 \dots 0,05$) с использованием полной нелинейной и линеаризованной кинематических связей для случаев: а) $\mu = 1, W_{\mu} = 0$; б) $\mu = 1, W_{\mu} = 50$; в) $\mu = 3, W_{\mu} = 0$; г) $\mu = 3, W_{\mu} = 50$. Нормальное к гиперболе положения ускорение W_{μ} подается в момент времени $t = 10$.

При движении БЛА вдоль гиперболы с постоянной скоростью 100 м/с для эллиптической дальности $\mu > 1$ получим среднюю оценку скорости $\dot{\mu} \approx 0,04$. Учитывая, что коэффициенты $\mu, \dot{\mu}$ меняются медленно по сравнению с динамическими переменными $\nu, \dot{\nu}$, получим передаточную функцию для выражения (17), используя принцип замороженных коэффициентов [1] и преобразование Лапласа.

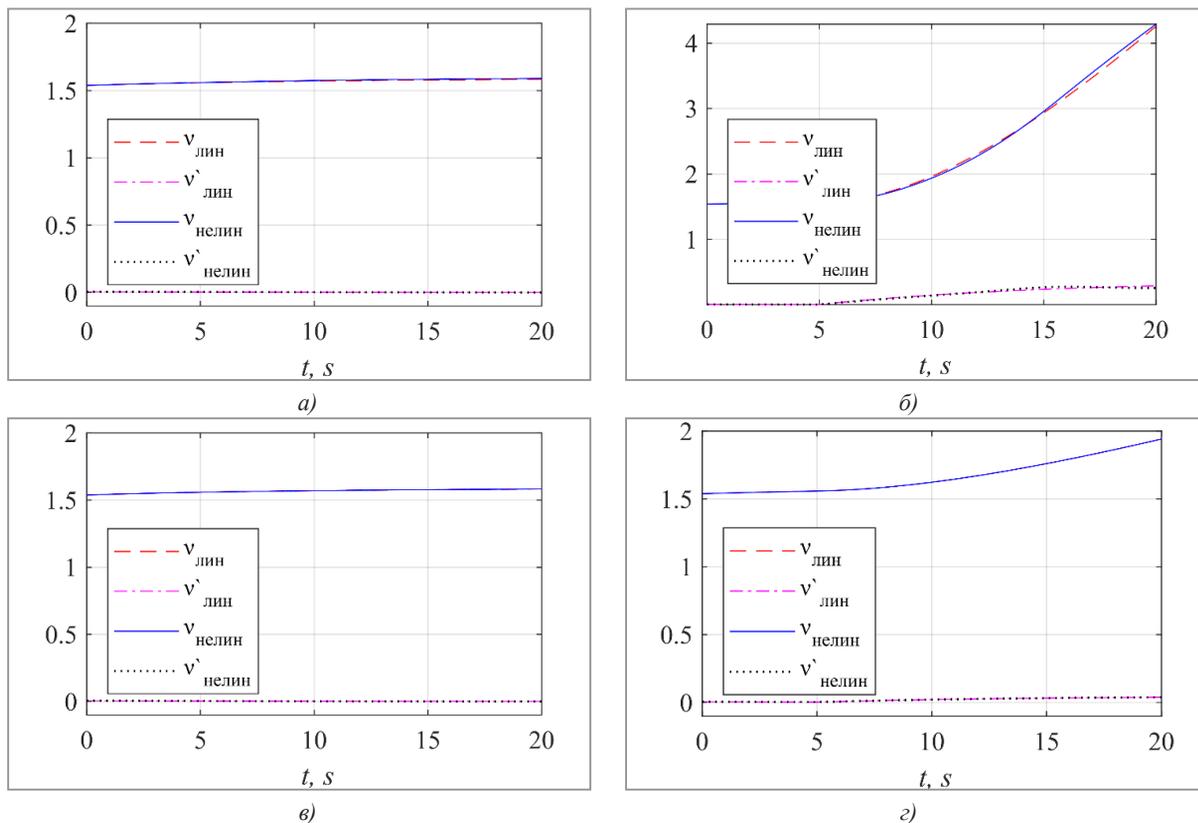


Рис. 6. Графики сравнения динамики исходной нелинейной ($v_{\text{нелин}}, \dot{v}_{\text{нелин}}$) и линеаризованной кинематических связей ($v_{\text{лин}}, \dot{v}_{\text{лин}}$).

Передаточная функция от входного управляющего ускорения W_{μ} до выходной координаты v :

$$\frac{v(s)}{W_{\mu}(s)} = \frac{1}{\sqrt{2} c \dot{\mu} \frac{\text{sh } 2\mu}{\sqrt{\text{ch } 2\mu}} s \left(1 + \frac{1}{2\dot{\mu} \tanh 2\mu} s \right)}, \quad (18)$$

где s – оператор Лапласа.

Как можно видеть, выражение (18) представляет собой последовательно соединенные интегрирующее и аperiodическое звенья:

$$\frac{v(s)}{W_{\mu}(s)} = \frac{K_{\mu}}{s(1 + T_{\mu}s)}, \quad (19)$$

где $K_{\mu} = \frac{\sqrt{\text{ch } 2\mu}}{\sqrt{2} c \dot{\mu} \text{sh } 2\mu} = \frac{\sqrt{2} T_{\mu}}{c \sqrt{\text{ch } 2\mu}}$ – коэффициент усиления;

$T_{\mu} = 1/(2\dot{\mu} \tanh 2\mu)$ – постоянная времени аperiodического звена.

Такая же комбинация звеньев представляет кинематическую связь в задачах телеуправления БЛА в виде [1]:

$$\frac{\varepsilon(s)}{W_{\text{н}}(s)} = \frac{1}{2\dot{r}s \left(\frac{r}{2\dot{r}}s + 1 \right)}, \quad (20)$$

где ε – угол наклона линии визирования БЛА с пункта наведения;

$W_{\text{н}}$ – проекция полного ускорения БЛА на перпендикуляр к линии визирования;

r – дальность между пунктом наведения и БЛА;

\dot{r} – скорость изменения дальности.

Дальнейшее упрощение выражения может быть основано на анализе постоянной времени аperiodического звена. Если $T_{\mu} \gg 1$ и ширина полосы пропускания аperiodического звена оказывается существенно ниже ширины полосы рабочих частот всей системы, то аperiodическое звено эквивалентно интегратору и выражение (20) записать как

$$\frac{v(s)}{W_{\mu}(s)} = c \sqrt{\frac{2}{\text{ch } 2\mu}} \frac{1}{s^2}, \quad (21)$$

которое является двойным интегрирующим звеном с коэффициентом передачи

$$k = c \sqrt{\frac{2}{\text{ch } 2\mu}}.$$

Заключение

Знание модели объекта управления, в том числе и всех присутствующих кинематических связей является необходимым условием для синтеза оптимального устройства управления. В данной работе были получены полная нелинейная и линеаризованная модели кинематической связи между управляющими полетом БЛА ускорениями и его координатами

в эллиптической системе координат. Проведенное компьютерное моделирование показало определенную схожесть двух моделей кинематической связи. Использование упрощенной линейной модели позволяет синтезировать контур управления БЛА линейными методами, развитыми в наибольшей степени в теории систем автоматического регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орлов Е. В. Проектирование систем телеуправления. – Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет», 200. 272с.
2. Алферов Г. В. Методическое пособие. Механика в криволинейных координатах. Санкт-Петербург 2006.
3. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970.
4. Рашевский. П. К. Риманова геометрия и тензорный анализ. – М. – Л.: Гостехиздат, 1953. – 635 с.
5. Позняк Э. Г. Дифференциальная геометрия: первое знакомство / Э. Г. Позняк, Е. В. Шикин. – Москва: Мир, 1990. – 719 с.
6. Вильке В. Г. Теоретическая механика: учебник и практикум для академического бакалавриата / В. Г. Вильке. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 311 с
7. Погорелов Д. Ю. Введение в моделирование динамики систем тел. Брянск: БГТУ. 1997. 156с.
8. Itskov M. Tensor Algebra and Tensor Analysis for Engineers with Applications to Continuum Mechanics. Springer, 2009.
9. Bowen R. M., and Wang C.-C. Introduction to Vectors and Tensors, Springer, New York, 1976.
10. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
11. Кун А. А., Лукьянов В. Ф., Шабан С. А. Основы построения систем управления ракетами. В 3-х ч. – Минск: Издание академии, 2001, 131с.
12. Ханукаев Ю. И. Введение в теоретическую механику: учебное пособие / Ю. И. Ханукаев. – М.: МФТИ, 2017. – 240 с.

REFERENCES

1. Khanukayev Yu. I. Vvedeniye v teoreticheskuyu mekhaniku: uchebnoye posobiye / YU. I. Khanukayev. – М.: МФТИ, 2017. – 240 s.
2. Alferov G. V. Metodicheskoye posobiye. Mekhanika v krivolineynykh koordinatakh. Sankt – Peterburg 2006
3. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – М.: Nauka, 1970.
4. Rashevskiy. P. K. Rimanova geometriya i tenzornyy analiz. – М. – Л.: Gostekhizdat, 1953. – 635 s.
5. Poznyak E. G. Differentsial'naya geometriya: pervoye znakomstvo / E. G. Poznyak, Ye. V. Shikin. – Moskva: Mir, 1990. – 719 s.
6. Vil'ke V. G. Teoreticheskaya mekhanika: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata / V. G. Vil'ke. – 4-ye izd., pererab. i dop. – М.: Izdatel'stvo Yurayt, 2016. – 311 s
7. Pogorelov D. Yu. Vvedeniye v modelirovaniye dinamiki sistem tel. Bryansk: BGTU. 1997. 156s.
8. Itskov M. Tensor Algebra and Tensor Analysis for Engineers with Applications to Continuum Mechanics. Springer, 2009.
9. Bowen R. M., and Wang C.-C. Introduction to Vectors and Tensors, Springer, New York, 1976.
10. Kim D. P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernyye, nelineynyye, optimal'nyye i adaptivnyye sistemy: Ucheb. posobiye. – М.: FIZMATLIT, 2004. – 464 s.
11. Kun A. A., Luk'yanov V. F., Shaban S. A. Osnovy postroyeniya sistem upravleniya raketami. V 3-kh ch. – Minsk: Izdaniye akademii, 2001, 131s.
12. Orlov Ye. V. Proyektirovaniye sistem teleupravleniya. – Izhevsk: Izdatel'skiy dom «Udmurtskiy universitet», 200. 272s.

Поступила
01.02.2021

После доработки
01.03.2021

Принята к печати
01.03.2021

LEGKOSTUP V. V., MARKEVICH V. E.

METHODOLOGY OF DETERMINING OF THE TRANSFER FUNCTION OF ENGAGEMENT KINEMATICS OF ACCELERATIONS OF AN AIRCRAFT AND ITS ELLIPTIC COORDINATES USED FOR THE GUIDANCE BASED ON TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL

JSC «ALEVKURP» (Minsk, Republic of Belarus)

This paper discusses the problem of determining a kinematics (in terms of transfer function, as far as possible) of parameters of the motion of an aircraft expressed in the curvilinear coordinate system and control accelerations expressed in a rectangular coordinate system. Examples of curvilinear coordinate systems using in practice can be polar, biangular, two-center bipolar, elliptic, parabolic cylindrical, spherical, ellipsoidal, coordinate systems. A technique for obtaining a kinematic link for the control problem of an unmanned aerial vehicle in the elliptic coordinate system was described. It allowed to obtain simpler view of the kinematic link which could provide navigation an aircraft along the hyperbola deriving from the time difference of arrival navigation system. It can. As a result, it is possible to reduce the number of the navigation radio beacons.

Keywords: *curvilinear coordinate system, Lamé coefficients, navigation, kinematics of navigation and guidance, UAV, TDoA.*



Легкоступ Виктор Валерьевич – магистр технических наук, научный сотрудник ОАО «АЛЕВКУРП».

Legkostup Victor Valeryevich – stuff researcher, JSC “ALEVKURP”.

E-mail: legkostupvv@gmail.com



Маркевич Виталий Эдмундович – кандидат технических наук, зам. директора ООО «Научно-производственное объединение САМЕРА».

Markevich Vitaliy Edmundovich – PhD, deputy director of LLC “SAMERA”.

E-mail: mark.vit@tut.by.

А. А. ЛОБАТЫЙ, А. Ю. БУМАЙ, С. С. ПРОХОРОВИЧ

ПОЭТАПНЫЙ АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОПИЛОТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Белорусский национальный технический университет

Рассматривается задача поэтапного синтеза математической модели автопилота беспилотного летательного аппарата (БЛА). На первом этапе производится аналитический синтез управляющего ускорения, приложенного к центру масс БЛА, для формирования заданной траектории его полёта. На основе использования полученных на первом этапе результатов на последующих этапах решается задача синтеза математической модели автопилота БЛА при заданных требованиях к обеспечению устойчивости и динамической точности управления БЛА. При реальных допущениях о соответствующем характере изменения параметров траектории и переменных, характеризующих движение БЛА в пространстве, обосновано использование линейной математической модели эволюции вектора состояния БЛА и его системы управления. При синтезе математической модели автопилота БЛА использован метод модального управления системой при заданной математической модели объекта. Для заданной модели движения и аэродинамических характеристик БЛА аналитически получен закон отклонения управляющей рулевой поверхности, зависящий от параметров поступательного и вращательного перемещения БЛА. Проведено компьютерное моделирование полученных аналитических результатов синтеза управления для заданных характеристик БЛА и конкретных условий применения, что наглядно показало работоспособность и перспективность использования данного подхода для синтеза системы управления БЛА различного предназначения и конструктивного исполнения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, математическая модель, синтез, модальное управление, траектория.

Введение

Существует большое разнообразие методов решения задач синтеза систем управления (СУ) самодвижущимися техническими объектами, представляющими собой робототехнические мехатронные комплексы, получающие всё большее распространение в различных областях человеческой деятельности. Это разнообразие методов обусловлено различным назначением, конструктивными особенностями, особенностями построения математических моделей элементов систем управления и других составляющих синтезируемых робототехнических систем, а также – факторов, учитывающих как внутреннее состояние систем, так и внешнее воздействие.

Среди робототехнических мехатронных систем (комплексов) следует выделить интенсивно развивающиеся и получающие всё большее распространение беспилотные летательные аппараты (БЛА). Так как БЛА осуществляют перемещение в трехмерном

пространстве, имеют сложный характер траектории и различные условия применения, то разработанные для БЛА методы и способы синтеза систем управления во многих случаях могут быть применимы и к другим самодвижущимся техническим объектам (комплексам), обладающим элементами искусственного интеллекта.

Так как современные технические системы управления обладают большой сложностью, состоят из большого числа элементов и подсистем, построенных на различных принципах, то в основе применения различных методов синтеза их систем управления лежит использование математических моделей, описывающих как внутреннее состояние системы, так и эволюцию внешней среды.

Математическая модель БЛА включает в себя математические зависимости, описывающие движение БЛА в пространстве и выражения описывающие функционирование его элементов и подсистем [1, 2]. В данном случае

отдельно следует выделить математическую модель системы управления БЛА, включающую в общем случае модели измерительных и исполнительных элементов, вид которых определяется их предназначением и конструктивным исполнением.

Так как полная математическая модель БЛА может включать в себя десятки и сотни дифференциальных уравнений и других математических выражений, то аналитический синтез закона управления БЛА следует проводить в несколько этапов, начиная с решения наиболее общей задачи и постепенно переходя к решению частных задач.

Главная задача синтеза СУ БЛА – это синтез математической модели автопилота – конструктивного блока, который формирует закон управления БЛА. Результатом функционирования СУ БЛА является целенаправленное изменение вектора скорости его центра масс \vec{V} по направлению и по величине, что приводит к изменению траектории полета БЛА в соответствии с полетным заданием. Кроме того СУ БЛА должна обеспечить соответствующую ориентацию БЛА относительно центра масс.

На центр масс БЛА в общем случае действуют три вектора силы: сила гравитации \vec{G} , сила тяги \vec{P} и аэродинамическая сила \vec{R} , состоящая из подъемной силы \vec{Y} , боковой силы \vec{Z} и силы лобового сопротивления \vec{X} [3]. При этом вектором тяги \vec{P} производится в основном изменение вектора \vec{V} по модулю, а направление \vec{V} изменяется с помощью изменения составляющих вектора \vec{R} (аэродинамическое управление). В конечном итоге под законом управления летательного аппарата понимается функциональная зависимость изменения угла отклонения соответствующей аэродинамической поверхности от параметров полета БЛА: аэродинамических углов, линейных и угловых ускорений, измеряемых соответствующими датчиками.

Синтез траекторного управления БЛА

В процессе полета БЛА при выполнении им поставленной задачи, как правило не предусматривается его энергичное маневрирование, системы БЛА не работают на предельных режимах, параметры его движения не достигают предельно допустимых значений. Кроме того угловые параметры, характеризующие

поступательное и вращательное движение БЛА, изменяются в небольших пределах, что позволяет соответствующим образом упростить представление тригонометрических функций, входящих в математическую модель движения БЛА. Гладкие дифференцируемые функциональные зависимости переменных, описывающих движение БЛА, позволяют провести линеаризацию этих зависимостей путем разложения их в ряд Тейлора. Всё это даёт возможность рассматривать математические модели движения БЛА разного уровня сложности в рамках линеаризованных уравнений [1, 2]. Кроме того разделение пространственного движения БЛА на два плоские движения – продольное и боковое (декомпозиция) позволяет достаточно полно описать динамику объекта управления посредством использования математического аппарата теории устойчивости и управления [4]. Таким образом, эволюция вектора $X(t)$ переменных, характеризующих перемещение БЛА в пространстве, представляется в виде линейного, в общем случае – нестационарного векторно-матричного дифференциального уравнения вида

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (1)$$

где $U(t)$ – вектор управлений, $A(t)$ и $B(t)$ – матрицы переменных коэффициентов. Компоненты матриц $A(t)$ и $B(t)$ зависят от аэродинамических коэффициентов конкретного БЛА, которые в свою очередь зависят от скорости его полета. Так как диапазон изменения скоростей БЛА ограничен, то эти коэффициенты, как правило, в пределах заданного диапазона скоростей считаются постоянными ($A(t) = A$, $B(t) = B$). Это позволяет при синтезе управления БЛА использовать аппарат передаточных функций, что существенно упрощает решение задачи.

Первоначальный этап синтеза СУ БЛА определяется характером изменения траектории полета БЛА которая, как правило, состоит из трех основных участков: $R_1(t_0, t_1)$, $R_2(t_1, t_2)$, $R_3(t_2, t_k)$, R_1 – траектория полета БЛА в зону выполнения основной задачи, R_2 – траектория полета БЛА по выполнению основной задачи (например, мониторинг земной поверхности), R_3 – траектория полета БЛА к месту приземления, как правило, это возвращение его к месту старта, t_0 и t_k соответственно – момент старта

и момент приземления БЛА. Для аналитического синтеза СУ БЛА необходимо иметь математическую модель траектории полета БЛА. Заданную траекторию можно аппроксимировать различными математическими зависимостями. В некоторых случаях удобно для этой цели использовать полиномы, в частности, отдельные участки траектории БЛА аппроксимировать полиномами вида [5]

$$R(t) = \sum_{k=0}^n C_k t^k. \quad (2)$$

В выражении (2) $R(t)$ – изменение во времени одной из линейных координат БЛА, t – текущее время полета БЛА, C_k ($k = 1, n$) – заданные коэффициенты.

Достаточно распространенной и актуальной является задача формирования траектории пролета БЛА через заданные точки пространства. В работе [6] на основе решений, полученных в [7] методами вариационного исчисления синтезирован закон управления перегрузкой центра масс БЛА при полете его через заданные точки пространства. Применительно к вертикальной плоскости полета этот закон изменения управляющей перегрузки БЛА $a_y = a_y(t)$ будет иметь следующий вид:

$$a_y = -\frac{4v_y}{t_{\text{ост}}} - \frac{6(y - y_{\text{зад}})}{(t_{\text{ост}})^2} + g, \quad (3)$$

$$t_{\text{ост}} = \frac{D + D_{\text{ост}}}{|\dot{D}|}. \quad (4)$$

В выражении (3) v_y – значение проекции скорости БЛА на вертикальную ось Y соответствующей инерциальной (стартовой) системы координат в момент t_k окончания полета (окончания заданного участка траектории), $y_{\text{зад}}$ – вертикальная координата заданной точки траектории полета БЛА в момент t_k , $t_k - t = t_{\text{ост}}$ – время, которое необходимо для достижения БЛА очередной заданной точки пространства, g – гравитационное ускорение. В формуле (4) D – текущая дальность от БЛА до очередной заданной точки траектории. $D_{\text{ост}}$ – остаточная дальность до окончания полета БЛА в заданную точку пространства, при достижении которой при дальнейшем неуправляемом полете по прямой точность наведения БЛА в заданную точку является приемлемой. Применение

в законе управления выражения (4) позволяет избавиться от нежелательного деления на ноль в формуле (3).

Задача синтеза

математической модели автопилота

Для решения задачи синтеза автопилота всю систему управления БЛА представим с помощью структурной схемы (Рис. 1).

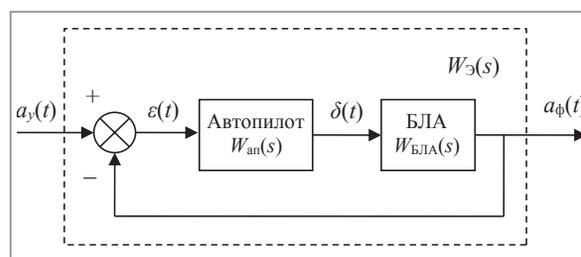


Рис. 1. Структурная схема системы управления БЛА

На Рис. 1 обозначено: $a_y(t)$ – управляющая перегрузка, вычисляемая по формуле (3); $a_f(t)$ – фактическая перегрузка центра масс БЛА, определяемая его аэродинамическими характеристиками; $W_{\text{БЛА}}(s)$ – передаточная функция БЛА; $W_{\text{ап}}(s)$ – передаточная функция автопилота; $W_{\text{э}}(s)$ – эталонная передаточная функция замкнутой системы; $\delta(t)$ – угол отклонения рулевой поверхности; $\varepsilon(t) = a_y(t) - a_f(t)$. Необходимо определить закон отклонения рулевой поверхности $\delta(t)$, реализуемый посредством $W_{\text{ап}}(s)$ и позволяющий обеспечить заданные свойства системы, определяемые эталонной передаточной функцией $W_{\text{э}}(s)$.

При заданной передаточной функции $W_{\text{БЛА}}(s)$ для определения $W_{\text{ап}}(s)$ необходимо задать $W_{\text{э}}(s)$ исходя из требований к системе в целом. В первую очередь необходимо обеспечить устойчивость синтезированной системы известными методами, среди которых наиболее распространенными являются алгебраический метод Рауса-Гурвица и частотный метод Найквиста-Михайлова [4].

После выполнения требований к обеспечению условий устойчивости эталонную передаточную функцию $W_{\text{э}}(s)$ выбирают исходя из требований, предъявляемых к точности системы при действии на неё полезных и возмущающих сигналов. Система, имеющая $W_{\text{э}}(s)$ должна фильтровать случайную помеху и обрабатывать полезный сигнал без ошибки в установившемся режиме. Фильтрация

случайных помех – отдельная задача, решаемая на основе так называемой «теоремы разделения» перед детерминированной постановкой задачи синтеза управления [4, 8].

Рассмотрим детерминированную задачу синтеза оптимального управления, предполагая, что задача фильтрации предварительно решена. Условием идеальной отработки входного сигнала без динамической ошибки является такая $W_3(s)$, которая обеспечивает точную передачу входного сигнала на любых частотах. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) такой системы $|W_3(j\omega)| = A_3(\omega)$ представляет собой идеальный фильтр (Рис. 2) в диапазоне полосы пропускания ω_0 системы.

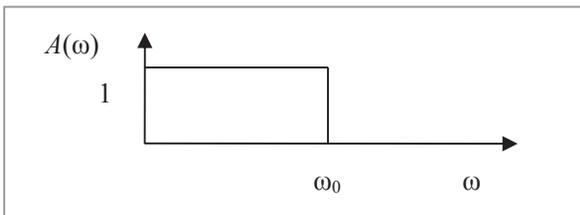


Рис. 2. АЧХ идеального фильтра

Поскольку $W_3(s)$ идеального низкочастотного фильтра физически не реализуема, то на практике используют аппроксимацию $|W_3(j\omega)|$ различными способами. Чаще всего для этой цели используют полиномы Баттерворса (в некоторых источниках – Баттерворта) [8], в основе которых лежит задание квадрата АЧХ $W_3(s)$ в виде

$$|W_3(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + (\omega/\omega_0)^{2n}}, \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (5)$$

В этом случае $W_3(s)$ задается в виде $W_3(s) = W_B(s) = 1/D(s)$, где $D(s)$ – полином Баттерворса $D(s) = 1 + d_1s + d_2s^2 + d_3s^3 + \dots + s^n$. Коэффициенты полиномов d_1, d_2, \dots, d_{n-1} , вычисляются известными способами и приведены в соответствующих источниках, например: при $n = 2, d_1 = 1.41421$; при $n = 3, d_1 = 2, d_2 = 2, d_3 = 1$; при $n = 4, d_1 = 2.61313, d_2 = 3.41421, d_3 = 2.61313, d_4 = 1$, и т.д.

Синтез модального управления БЛА

Если математическая модель, используемая для синтеза СУ БЛА, задана в виде системы обыкновенных линейных стационарных дифференциальных уравнений или передаточных функций, то для синтеза СУ удобно применить

так называемый метод модального управления (синтез модальных регуляторов), который заключается в изменении мод (собственных чисел матрицы объекта), с целью достижения желаемых целей управления. При этом необходимо определить матрицу коэффициентов динамической обратной связи, обеспечивающей замкнутой системе требуемое расположение мод [4].

Рассмотрим задачу синтеза скалярного управления БЛА в предположении наличия математической модели полностью измеряемого вектора состояния. Пусть синтезированный аналитически закон управления перегрузкой БЛА представляется в виде выражения (3) а уравнения движения БЛА в вертикальной плоскости имеют вид [1]

$$a_y = \frac{1}{m}(C_y^\alpha S_q \alpha - C_x S_a q + P \cos \alpha), \quad (6)$$

$$\dot{\omega}_z = \frac{1}{J_{zz}}(m_z^\alpha \alpha + m_z^\omega \omega_z + m_z^\delta \delta) S_a q l_\alpha. \quad (7)$$

В выражениях (6) – (7) a_y – ускорение БЛА по оси Y , ω_z – угловая скорость вращения БЛА в вертикальной плоскости относительно оси Z , m – масса БЛА, J_{zz} – момент инерции БЛА, S_a – площадь аэродинамической поверхности, создающей подъёмную силу, l_a – характерный линейный размер (хорда крыла), α – угол атаки, $q = \frac{\rho V^2}{2}$ – скоростной напор, $C_y^\alpha, C_x, m_z^\alpha, m_z^\omega, m_z^\delta$ – известные аэродинамические коэффициенты конкретного БЛА.

Считая угол атаки α малым ($\cos \alpha \approx 1, \sin \alpha \approx \alpha$), учитывая, что $\dot{\alpha} = \omega_z - \frac{1}{mV}(C_y^\alpha \alpha S q)$, проинтегрировав выражение (6) по времени и, обозначив $a_y = x_1, \omega_z = x_2, \delta = u$, перепишем выражения (6) и (7) в виде [9]:

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2, \quad x_1(t_0) = x_{10}, \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + bu, \quad x_2(t_0) = x_{20}, \quad (9)$$

$$\text{где } a_{11} = -\frac{(C_y^\alpha S q + P)}{mV} = -1.54,$$

$$a_{12} = \frac{1}{m}(C_y^\alpha S q - C_x S q) = 75,$$

$$a_{21} = \frac{m_z^\alpha \cdot l \cdot m}{I_{yy}(C_z^\beta - C_x)} = -0.55,$$

$$a_{22} = \frac{m_z^\omega \cdot S \cdot l \cdot q}{I_{zz}} = -17,$$

$$b = \frac{m_z^{\delta} \cdot S \cdot l \cdot q}{I_{zz}} = -170.$$

Коэффициенты a_{ij} и b рассматривались для конкретного БЛА [9] при его высоте полета 1000 м, скорости $V = 50$ м/с, массой $m = 50$ кг, $I_{zz} = 15$ кг м², $S_a = 1$ м², $l_a = 1$ м, при тяге двигателя $P = 100$ н.

В соответствии с выражениями (1), (8), (9) уравнение состояния объекта управления (БЛА) имеет вид:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t), \quad X(t_0) = X_0, \quad (10)$$

где матрицы A и B в данном случае имеют вид: $A = \begin{bmatrix} -1,54 & 75 \\ -0,55 & -17 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -170 \end{bmatrix}$.

Необходимо синтезировать для заданной системы модальный регулятор, который обеспечивал бы замкнутой системе желаемый спектр. Для синтеза модального управления БЛА, описываемого стационарным дифференциальными уравнениями (10) применим методу, изложенную в [8].

1) Проверяем управляемость системы, вычисляя ранг матрицы управляемости.

$$M_y = [b \quad Ab] = \begin{bmatrix} 0 & -1275 \\ -170 & -890 \end{bmatrix}, \quad \text{rank } M_y = 2,$$

следовательно, система второго порядка управляема.

2) Определяем характеристический полином матрицы A , который имеет вид:

$$\begin{aligned} \varphi_A(s) &= \det(A - sI) = \\ &= \det \begin{bmatrix} -1,54 - s & 75 \\ -0,55 & -17 - s \end{bmatrix} = s^2 + a_1s + a_0, \end{aligned}$$

где $-$ единичная матрица, $a_1 = 18,54$, $a_0 = 67,43$.

3) Сопровождающая матрица полинома $\varphi_A(s)$ определяется следующим образом:

$$\tilde{M}_y = [\tilde{b} \quad \tilde{A} \cdot \tilde{b}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -18,54 \end{bmatrix},$$

$$\text{где } \tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix}, \quad \tilde{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

4) Находим матрицу преобразования Q согласно формуле $Q = \tilde{M}_y \cdot M_x^{-1}$. Подставив значения элементов матрицы \tilde{M}_y и обратной матрицы M_x^{-1} , получим:

$$Q = \begin{bmatrix} -0,0000784 & 0 \\ 0,000121 & -0,00588 \end{bmatrix}.$$

5) Определяем желаемый характеристический полином. В данном случае для системы второго порядка полином Баттерворса имеет вид: $\varphi^*(s) = s^2 + \alpha_1^*s + \alpha_0^*$, где $\alpha_1^* = 1,41$, $\alpha_0^* = 1$.

6) Вычисляем коэффициенты регулятора для преобразованной системы по формуле $\tilde{K}^T = [\tilde{K}_1 \quad \tilde{K}_2]$, где $\tilde{K}_1 = a_0 - \alpha_0^* = 66,43$, $\tilde{K}_2 = a_1 - \alpha_1^* = 17,13$.

7) Находим коэффициенты модального регулятора в исходном базисе по формуле

$$K^T = \tilde{K}^T Q = [-0,03141 \quad -0,101].$$

8) Проверяем, что замкнутая система имеет требуемый спектр.

$$\text{Имеем } A + bK^T = \begin{bmatrix} -0,54 & 75 \\ -0,016 & 0,13 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{aligned} \varphi_{A+bK^T}(s) &= \det(A + bK^T - sI) = \\ &= \det \begin{bmatrix} -1,54 - s & 75 \\ -0,016 & 0,13 - s \end{bmatrix} = s^2 + 1,41s + 1 \end{aligned}$$

Сравнивая характеристический полином спроектированной замкнутой системы с желаемым полиномом убеждаемся, что регулятор (автопилот) спроектирован верно ($\varphi_{A+bK^T}(s) = \varphi^*(s)$). Таким образом, аналитически получен закон управления БЛА, который с учетом введенных обозначений имеет вид

$$\delta = -0,003141a_y - 0,101\omega_z. \quad (11)$$

Данный закон управления (11) обеспечивает необходимую устойчивость БЛА и точность обработки управляющей перегрузки БЛА, при реализации которой БЛА осуществляет полет по заданной траектории.

В качестве примера рассмотрено математическое моделирование данной задачи в среде Mathcad. Требуемая перегрузка БЛА определялась на основе выражений (3) – (4) при следующих заданных значениях условий применения: $v = 50$ м/с = const, $D_{\text{ост}} = 50$ м. Были заданы следующие координаты точек пространства, через которые должен пролететь БЛА: $x_1 = 0$ м, $y_1 = 500$ м; $x_2 = 850$ м, $y_2 = 200$ м. Результаты математического (компьютерного) моделирования в виде графиков изменения во времени переменных, характеризующих полет БЛА, представлены на Рис. 4.

Как видно из рисунков, результаты моделирования свидетельствуют о работоспособности данной методики синтеза законов

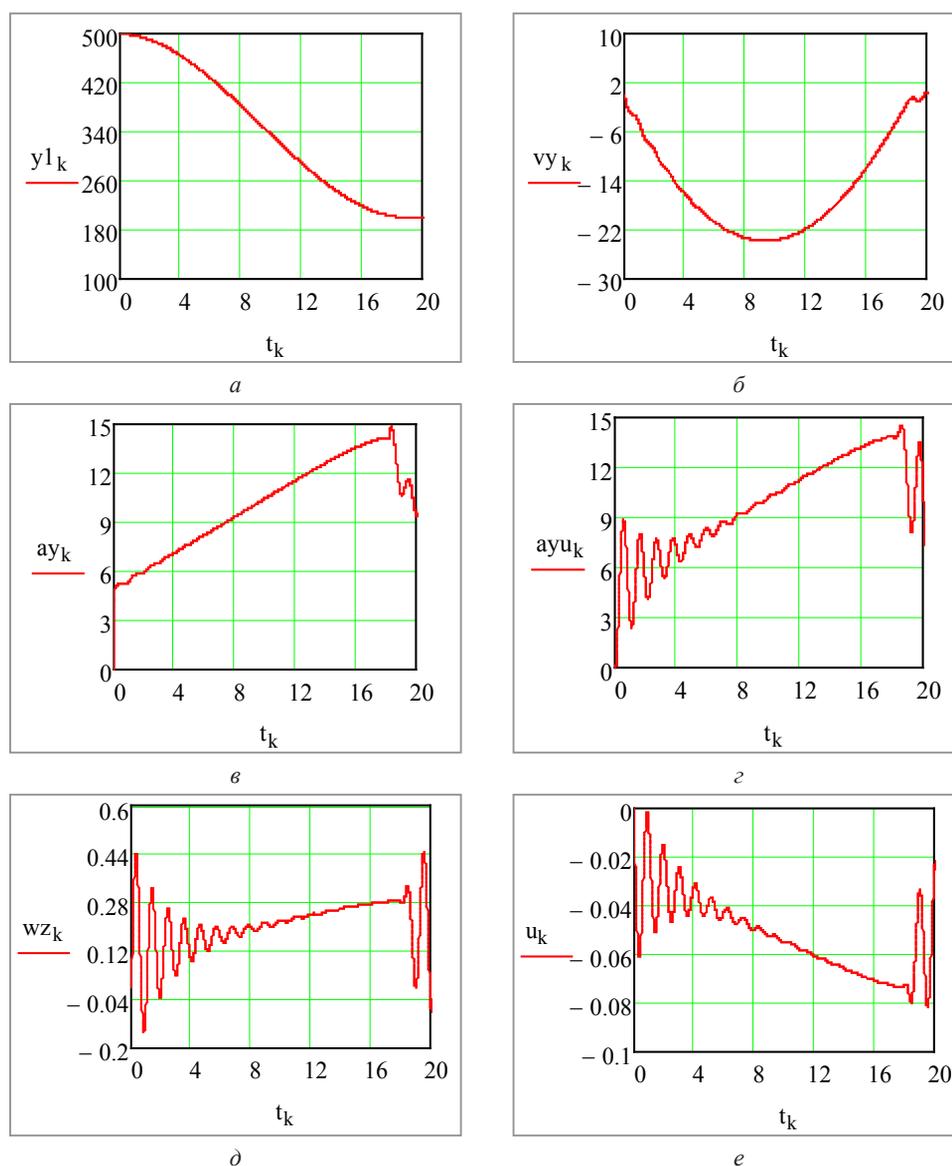


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования
 а – график изменения высоты (траектории) БЛА; б – вертикальная скорость БЛА;
 в – потребная перегрузка БЛА; г – фактическая перегрузка БЛА;
 д – угловая скорость вращения БЛА; е – угол отклонения управляющей рулевой поверхности.

управления БЛА. Полученные виды переходных процессов обусловлены приближенным заданием математической модели объекта управления, величины параметров переходных процессов не превышают допустимых значений. Следует заметить, что при практической реализации полученных алгоритмов эти переходные процессы будут сглажены инерционностью реальных элементов системы управления БЛА (приводов рулей, измерителей и т. д.).

Заключение

Таким образом, представленная методика поэтапного аналитического синтеза закона

управления БЛА является основой для формирования структуры построения автопилота БЛА в виде закона изменения угла отклонения рулевой поверхности (рулей по каждому каналу управления) в виде функциональной зависимости $\delta_y = f(a_y, p_i, t)$, в которой $p_i = p_i(t)$ – измеряемые датчиками БЛА параметры, характеризующие его пространственное перемещение.

В зависимости от вида математических моделей, описывающих пространственное перемещение БЛА, в том числе и относительно центра масс для синтеза элементов СУ БЛА применяются различные известные методы синтеза регуляторов систем управления. Так как

невозможно абсолютно точно описать математически все процессы, протекающие в БЛА и влияющие на его состояние, то на заключительных этапах синтеза системы управления БЛА, как и любой другой сложной технической системы, приходится производить коррекцию регулируемых параметров автопилота (параметрическую оптимизацию) под конкретную конструкцию БЛА и конкретные условия его применения.

При использовании математических моделей БЛА более высокой размерности приведенная выше методика остается справедливой. При этом отличия будут состоять в определении желаемого спектра (характеристического полинома) замкнутой системы. Его построение целесообразно проводить в классе низкочастотных фильтров Баттерворса, принцип построения которых основан на аппроксимации

амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) эталонной системы в заданной частотной области функционирования. Для аппроксимации АЧХ могут быть использованы также полиномы Чебышева или полиномы Лежандра.

Данный подход в определении управляющего сигнала автопилота по отклонению рулевой поверхности БЛА может быть применен и для решения пространственной задачи управления БЛА. Это может производиться отдельным решением двух плоских задач с последующим их объединением, или решением задачи в новой введенной вращающейся системе координат, связанной с вектором дальности БЛА до очередной точки пространства с последующим разделением по каналам управления БЛА с помощью матрицы преобразования координат (матрицы направляющих косинусов).

ЛИТЕРАТУРА

1. Красовский А. А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А. А. Красовский А. А., Ю. А. Вавилов, А. И. Сучков. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. – 477 с.
2. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. – Казань: ГБУ РЦМКО, 2013. – 768 с.
3. Дмитриевский А. А. Внешняя баллистика / А. А. Дмитриевский, Л. Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.
4. Красовский А. А. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
5. Красильщиков М. Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Серебрякова. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
6. Лобатый А. А. Формирование оптимальных параметров траектории пролета беспилотного летательного аппарата через заданные точки пространства / А. А. Лобатый, А. Ю. Бумай, Ду Цзюнь // Доклады БГУИР, 2019. № 7–8. С. 50–57.
7. Брайсон А. Прикладная теория оптимального управления / А. Брайсон, Хо Ю-ши. – М.: Мир, 1972. – 544 с.
8. Пупков К. А. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-ти тт.; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.
9. Лобаты, А. А. Аналитический синтез управления беспилотным летательным аппаратом / А. А. Лобатый, А. А. Антаневич, Ю. Ф. Икуас // Сборник статей ВА РБ. – 2009. – № 17. – С. 62–66.

REFERENCE

1. Krasovskij A. A. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija letatelnyh apparatov / A. A. Krasovskij A. A., Ju. A. Vavilov, A. I. Suchkov. – М.: VVIA im. N. E. Zhukovskogo, 1986. – 477 s.
2. Moiseev V. S. Prikladnaja teorija upravlenija bespilotnymi letatelnyimi apparatami / V. S. Moiseev. – Kazan: GBU RCMKO, 2013. – 768 s.
3. Dmitrievskij A. A. Vneshnjaja ballistika / A. A. Dmitrievskij, L. N. Lysenko. – М.: Mashinostroenie, 2005. – 608 s.
4. Krasovskij A. A. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija / pod red. A. A. Krasovskogo. – М.: Nauka, 1987. – 712 s.
5. Krasilshhikov M. N. Sovremennye informacionnye tehnologii v zadachah navigacii i navedenija bespilotnyh manevrennyh letatel'nyh apparatov / pod red. M. N. Krasilshhikova, G. G. Serebrjakova. – М.: Fizmatlit, 2009. – 556 s.
6. Lobaty A. A. Formirovanie optimalnyh parametrov traektorii proleta bespilotnogo letatel'nogo apparata cherez zadannye tochki prostranstva / A. A. Lobaty, A. Y. Bumai, Du Jun // Doklady BGUIR, 2019. Vol. 7–8. pp 50–57.
7. Brajson A. Prikladnaja teorija optimal'nogo upravlenija / A. Brajson, Ho Ju-shi. – М.: Mir, 1972. – 544 s.
8. Pupkov K. A. Metody klassicheskoi i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravlenija: Uchebnik v 5-ti tt.; 2-e izd, pererab. i dop. T.3: Sintez reguljatorov sistem avtomaticheskogo upravlenija / Pod red. K. A. Pupkova i N. D. Egupova. – М.: Izdatel'stvo MG TU im. N. Je. Baumana, 2004. – 616 s.
9. Lobaty A. A. Analiticheskij sintez upravlenija bespilotnym letatelnyim apparatom / A. A. Lobaty, A. A. Antanovich, Ju. F. Ikuas // Sbornik statej VA RB. – 2009. Vol. 17. pp 62–66.

Поступила
23.01.2021

После доработки
23.01.2021

Принята к печати
01.03.2021

LOBATY A. A., BUMAI A. Y., PROHOROVITH S. S.

STEP-BY-STEP ANALYTICAL SYNTHESIS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMOTIVE UNMANNED AIRCRAFT

The problem of the stage-by-stage synthesis of the mathematical model of the autopilot of an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered. At the first stage, an analytical synthesis of the control acceleration applied to the center of mass of the UAV is performed to form a specified trajectory of its flight. On the basis of the results received at the first stage, at the subsequent stages, the problem of synthesizing a mathematical model of the UAV autopilot is solved with the specified requirements for ensuring the stability and dynamic accuracy of UAV control. Under actual assumptions about the corresponding nature of changes in the trajectory parameters and variables that characterize the motion of the UAV in space, the use of a linear mathematical model of the evolution of the state vector of the UAV and its control system is substantiated. When synthesizing a mathematical model of the UAV autopilot, the method of modal control of the system was used for a specified mathematical model of the object. For a specified model of motion and aerodynamic characteristics of the UAV, the law of deviation of the control steering surface is analytically received, which depends on the parameters of the translational and rotational movements of the UAV. Computer simulation of the analytically received results of control synthesis for the specified characteristics of UAVs and specific using conditions was carried out, which clearly showed the efficiency and prospects of using this approach for the synthesis of control systems for UAVs of various purposes and design.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, mathematical model, synthesis, modal control, trajectory.*



Лобатый Александр Александрович, доктор технических наук, профессор. С 2000 года возглавляет кафедру «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза систем управления, в том числе – беспилотными летательными аппаратами. Автор и соавтор множества статей в научных журналах и конференциях, автор ряда книг и учебных пособий. Тел: +375 (29) 346–82–56. E-mail: lobaty@bntu.by

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

control systems including unmanned aerial vehicles. He is the author and co-author of many articles in scientific journals, conferences and books.



Бумай Андрей Юрьевич, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

E-mail: andrei.bumai@bntu.by

Bumai A. Y., PhD student of «Information Systems and Technologies» department of Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of stochastic control systems applying to unmanned aerial vehicles.



Прохорович Сергей Сергеевич, аспирант кафедры «Робототехнические системы» Белорусского национального технического университета. Проводит исследования в области анализа и синтеза стохастических систем управления применительно к беспилотным летательным аппаратам.

E-mail: Sergeyprohorovich@gmail.com

Prohorovith S. S., PhD student of « Information Systems and Technologies» department of Belarusian National Technical University. Conducts research in the areas of analysis and synthesis of stochastic control systems applying to unmanned aerial vehicles.

V. G. MIKHAILOV

DATA TRANSMISSION WITH SIMULINK ON 6-DOF PLATFORM ON CAN BUS

Use of CAN BUS for data transmission in Real-Time mode with Simulink on control objects is considered (6-DoF a platform).

It is revealed that software of CAN_API.dll adapters, created in the Microsoft Visual Studio (MVS) does not work with TDM-GCC-64 Matlab/Simulink because of different approach in names of the dll functions according to the standard C++ 11/17. Recompile by the developer of the adapter of its software (dll) in the TDM-GCC-64 environment under Windows is required.

It is established that CAN BUS considerably reduces modeling speed by 4.5 times. The way of information compression and fall forward of exchange twice due to byte-by-byte entering of two float values in the data field is offered. Use of identical values of identifiers is applied to two cylinders 6-DoF of a platform and the subsequent their division in the program microcontrollers of cylinders.

For implementation of a Real-Time mode in addition to compression it is offered to transfer data with the smaller frequency (quantization) by what a modeling clock period. It was considered that 6-DoF platforms reproduce frequency band to 10–12 Hz. The program of transfer/data exchange with Simulink on stand control devices with quantization is developed. Influence of parameter of quantization for the period of modeling is investigated. It is established that the Real-Time mode of modeling is provided in the range of parameters of quantization ($chc=1/350-1/1000$). Frequency of exchange with 6 cylinders at the same time corresponds to 230, 150 Hz.

Keywords: Simulation modeling, vehicle, simulator, electroactuator, Matlab/Simulink, CAN BUS, 6-DoF platform.

Now abroad, to reduce the time of development and development of designs of aircraft, vehicles, various control objects, simulation methods are increasingly being used [1, 2]. In the course of such modeling real control objects, actuation mechanisms and the human-operator are involved [1, 2]. An example of this are aviasimulators, semi-natural modeling of the vehicle at the stand with involvement of the driver with simulating of visualization of a road situation and influence real macro and a microprofile of the road (Fig. 1). All this significantly influences the mode of the movement and loading of the vehicle.

It allows to develop for the vehicle on models a large number of road situations and options of construction. Test them in bench conditions, fulfill ergonomics and considerably to reduce time of creation of new models of machines, without putting at risk of drivers and testers. And aviasimulator allows to simulate critical situations and to train pilots.

As executive elements in them electroactuators in the form of the mechanical cylinder with belt and worm ball drive and the electric motor with the block of electronic control are widely used now. The cost of the Chinese 6-DOF platform (\$ 7800) is one-two orders

lower than at hydropulsators [3]. According to documentation of MOOG [4] the simulation MB-EP-6DOF/40/10000 platform can provide acceleration of 13 m/s^2 , the speed of 0,9 m/s with an amplitude of 0,73/0,81 m. Elektroactuators of MOOG, Parker are used in simulators of firms Mercedes Benz, Volvo, Ford.

Electroactuators are widely used in industrial robots, exercise machines. At the same time on the range of frequencies (0–10/12 Hz) and the enclosed loadings (10–20 kN) electroactuators nevertheless are inferior to hydropulsators (0–30 Hz and 100–500 kN). Despite it electroactuators have the niche of application: robots, research stands, exercise machines, actuation mechanisms of management where big values are not required. Hydropulsators are more used for resource tests.

As simulators the Matlab/Simulink package in the environment of Windows 7–10 64-bit is generally used now. Most efficiently for modeling is creation of the program in language C in S-Function Builder Matlab/Simulink. Development of the last requires use of the compiler TDM-GCC-64.

An important point is ensuring compatibility of all software components on digit capacity and compliances of compilers and OS.

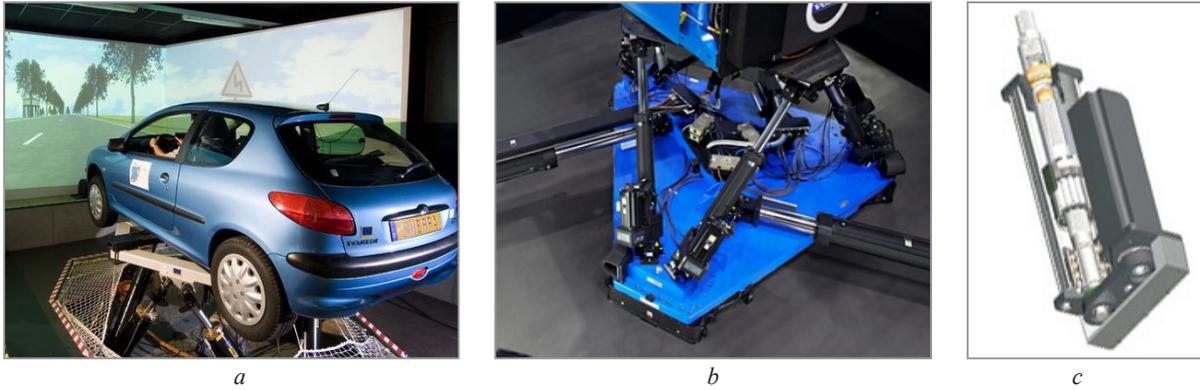


Fig. 1. Simulation modeling of the vehicle (a) in bench conditions and construction of electroactuator (b, c)

Difficult question is simultaneous implementation of modeling of the vehicle in Real-Time mode on Matlab/Simulink and transfer of data from it on control objects with a necessary speed (to 100 Hz for each 6 cylinders, actually 600 Hz) to provide an error of 1% at a higher frequency of 10 Hz.

Exchange through binary files on network does not provide correct data transmission because of not synchronization of write processes and reading with such frequencies.

For data transmission it is reasonable to use the CAN BUS protocol (1024 kbps). It is widely applied in robots, an avia and automotive industry in management systems to data exchange between microcontrollers, thanks to the simplicity, reliability and speed now.

Feature of CAN BUS is use of the twisted pair cable as a cable (Fig. 2).

Data transmission is carried out by means of the frame containing both the service and transmitted data. The data field consists 8 character bytes. The number of the connected controllers is defined by value of a code of the identifier in a frame. In standard 11 bit option to 127.

Data transmission on CAN BUS requires existence of adapters which connect the computer equipment with control devices (Fig. 2) or existence them in the microcontroller. Now there were industrial adapters at data transmission rate to 10–12 Mbps. However their implementation restrains high cost (> \$3000). The majority modern electro and hydroactuators are equipped with CAN BUS interfaces and vendors offer instructions and tools for developing of programs on language C.

Data transmission requires still the software for adapters, which differs at different vendors in a look different sale of the adapter. Vendors, as

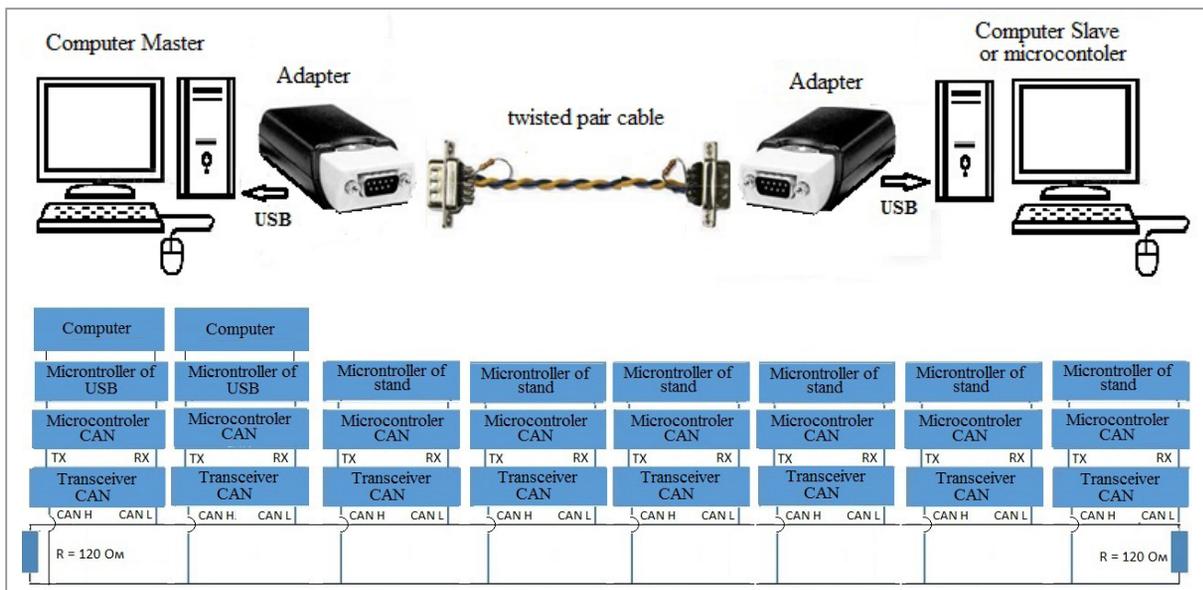


Fig. 2. The offered general transmission scheme of data with Simulink on the stand

a rule, offer software in the form of CAN_API.dll created in MicroSoft Visual Studio (MVS) or Linux without providing source texts.

By testing it is established that CAN_API.dll software, compiled in MVS do not work with TDM-GCC-64 Matlab/Simulink because of different approach in names of the dll functions according to the standard C++ 11. To fix this problem recompile of dll in the TDM-GCC-64 environment under Windows which only the dll developer can execute is required.

For an exception of decline in the performance of the computer and the adapter it is offered to transfer data not to a modeling clock period, and with quantization is one-two orders less when ensuring acceptable transmit frequency of data on the stand.

The limiting factor of CAN BUS is cable length: at $l < 40$ m can be provided transmission rate of 1–3 Mbps, and already at 100 m only of 500 kbps.

Now in the Matlab/Simulink R2019b version there were components allowing to create communication on CAN BUS through Virtual Channel (500 Kbps), Vehicle Network Toolbox. They demand separate purchase and use of expensive adapters and the special equipment of certain firms, such as, Vector, Kvaser, PEAK-System and others and their software.

Unfortunately, there are no publications on implementation of this solution for stands with a large number of cylinders. Not clearly how to change in the program way the CAN parameters where tabular configuration of the channel is used, how to carry out quantization and whether there will be enough offered exchange rate of 500 Kbps with for 6 actuators and 3 computers (it is actually received 45 Kbps with on an object). And as it will influence speed modeling.

The purpose of this work is the research of use of CAN BUS for data transmission on electroactuators of 6-DoF platform via the S-Function Builder module and implementation of modeling in Matlab/Simulink in Real-Time mode.

1. Choice of the adapter and development tools

The choice of the adapter is the key moment for modeling. Basic data is the possibility of implementation of the frequency of 100 Hz on each cylinder from 6, used in a platform 6-DOF. In this case it is possible to provide an error of 1% at

a higher frequency. Proceeding from it the adapter of TITAN ELECTRONICS INC was selected, SN #T16820100, Taiwan. This adapter is the most optimum, economical and competitive in terms of price and quality [8]. It is the industrial adapter realizing data transmission with a speed up to 3000 Mbps. Other manufacturers usually have speed up to 1000 Mbps and the price is higher or dealers do not provide software for the adapter. Besides, this firm met requirements of me, free of charge provided two adapters and recompiled software under TDM-GCC-64 also helped at the initial stage with CAN BUS.

I am grateful to it for. It removed a problem of incompatibility of the created program with use of CAN_API.dll for Matlab/Simulink.

Features of use of this adapter are given in appendix A.

For modeling the Matlab/Simulink R2015b package was used (ode5 Dormand-Prince, $t=0,001$ s). It works twice quicker than R2018b–R2020b. Perhaps oversaturation is their new functions the reason of deceleration.

Its choice is caused by the fact that it twice quicker than R2018b. Perhaps the reason for the latter is the oversaturation of its new functions, which are not needed for this task.

In the beginning working of of the program was carried out on the old 2-core computer (2.5 GHz, RAM of 8 Gbytes) on Windows 7 64-bit. For development of the program the compiler TDM-GCC-64 (tdm64-gcc-5.1.0–2.exe) was used. Its installation and configuration is described in work [6]. Windows 10 requires still installation of a way on C:\TDM-GCC-64\bin via the Set Path button on the Matlab panel.

Modeling was carried out with use of real perturbation of the road [9] in the form of an array of 96000 records of the float type in electronic memory. By means of the module of S-Function Builder accomplishment of logical actions on switching of the check point, calculation of traction dynamics of the vehicle was carried out. More perfect models providing an error of 10–15% taking into account a range [6], [7], [9], [10] were used. Besides in separate Simulink blocks vibrations, controllability of the car were modelled. Visualization was carried out by means of the Raspberry 3B+ minicomputer.

The choice of such approach was caused by need of ensuring maximum speed of modeling in Real-Time mode.

2. Implementation of exchange of information

The realization of modeling with data transmission on CAN BUS was enabled by means of the skeleton diagram (Fig. 3) and flowcharts (Fig. 4) in which 18 integrators are involved.

For modeling the computer was used (AMD Rysen 52600, 6 core 3,4/4 GHz, RAM of 16 GB DDR-42666 MHz, the drive M2. SSD of 2500 Mbps, MB ASUS PRIME B450 PLUS,

$t=0,0001$ c) and a detail from the game console. Data transmission in an asynchronous mode. Reception of messages was carried out on the old 2 core AMD computer of 2,5 GHz, RAM of =8 GB DDR-2400 MHz, MB ASUS M2-VM which imitated the actuation mechanism. Working of of modeling at this stage was carried out on a model desktop sample.

For data transmission with Simulink on stands the program on C is developed for S-Function

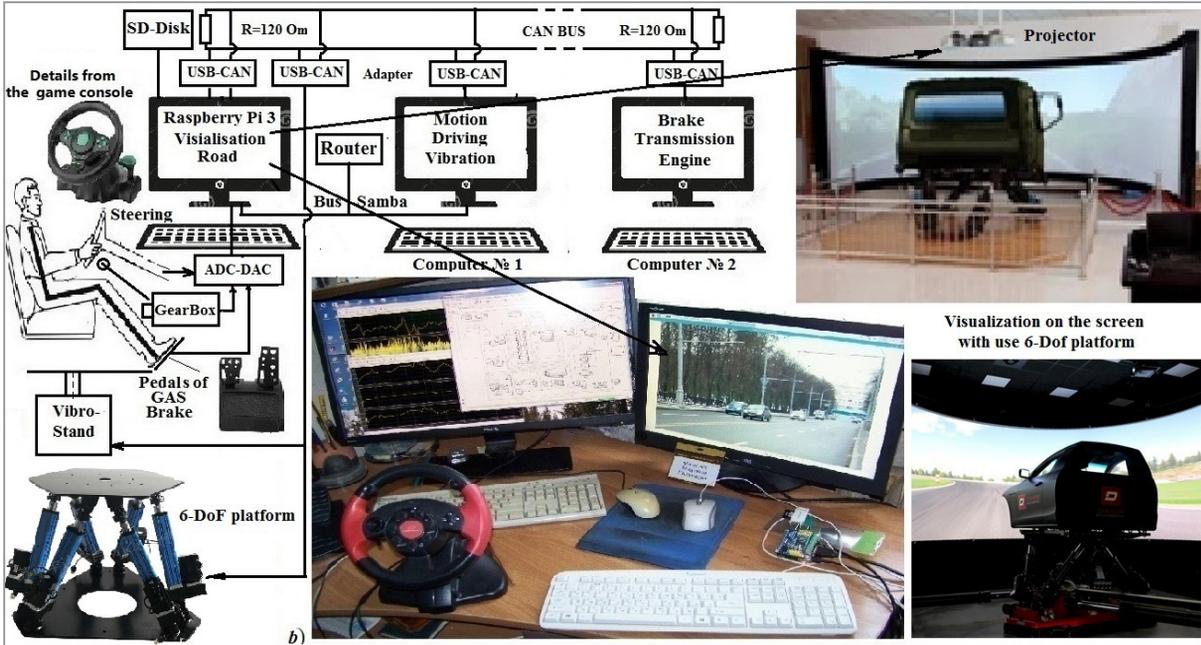


Fig. 3. Scheme of implementation of simulation modeling of the vehicle

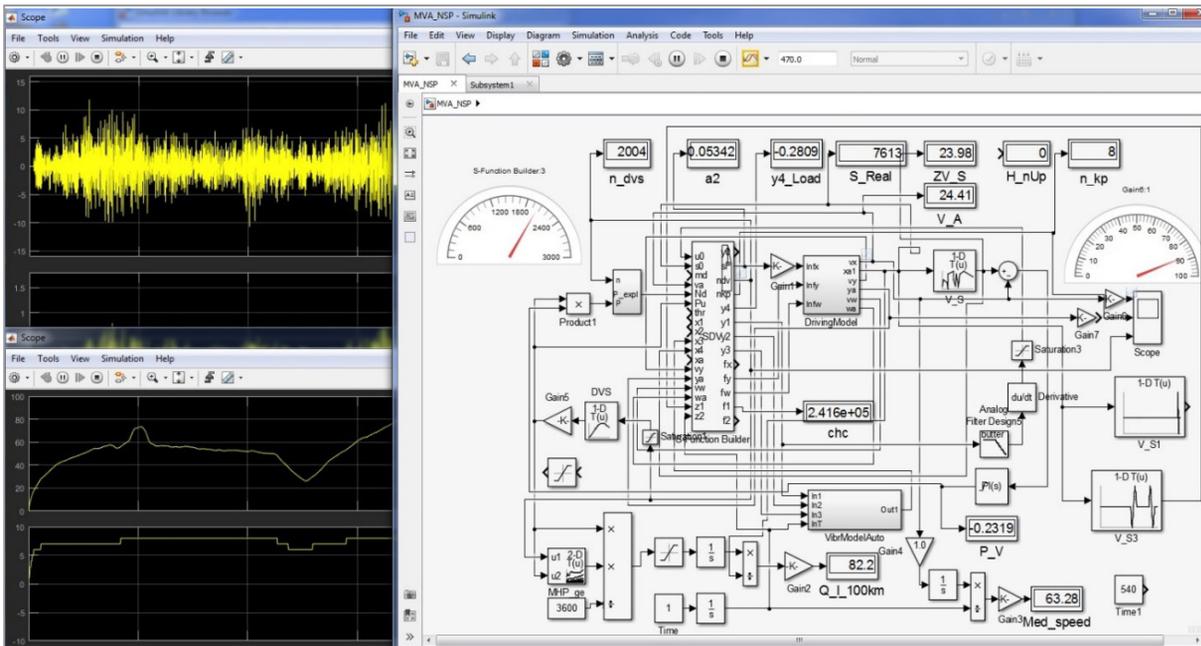


Fig. 4. Process and flowchart of modeling of the movement, fluctuations and controllability of the vehicle

Builder which total amount made 1372 lines of a source text. From them 850 lines are the share of the service S-Function Builder parameters. Initial debugging of transfer and data reception on CAN BUS was carried out on the `srd.c` program given below which will help you to create the program. Its void `srd` function (struct `ds*ps`, struct `dr*pr`) is used in the general program for S-Function Builder.

The functions used in the program and configuration of the adapter are in detail described in [8]. In the directory with the `wrdc.c` program the `CAN_API.dll` and `CAN_API.h` files should be set. That to compile it enter the team into TDM-GCC-64 `gcc wrdc.c`. As a result the executable file of `a.exe` will turn out.

In the beginning information for 6 actuators is brought in a data structure of struct `ds sf`. As void `srd()` data compression is realized: entering in the field of 8 bytes of `SendMSG.Data` of [0] two float values of data is byte-by-byte instead of one (this fragment is highlighted in yellow color). Actually it is data transmission by blocks on two actuators at the same time.

Further as void `sd` (struct `ds*sp`, struct `dr*rp`) realized data compression: entering in the field of 8 bytes of `SendMSG.Data` of [0] two float values of data is byte-by-byte instead of one (the fragment is highlighted in yellow color).

Actually it is data transmission by blocks on two actuators at once having the identical identifier.

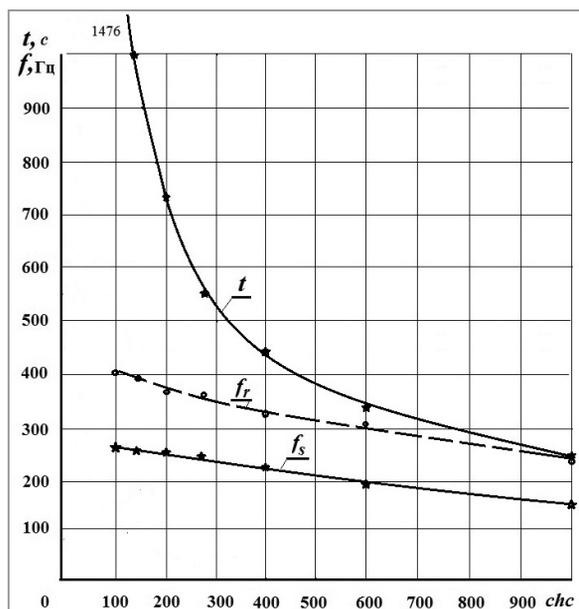
And in the program of the controller of the actuator their program division is made. It allows to increase data exchange productivity twice (thereby to 6 Mbps).

3. Results of modeling

Data transmission was carried out with frequency on a cycle timer of `chc` which was nullified at achievement of the maximum value. The cycle timer of `chc` defines quantity of clock periods of modeling after which there is a data transmission on 6 electroactuators on CAN BUS. It allows to reduce expenses of time for information transfer. Quantization in 100 Hz is quite enough for reproduction by the stand of the higher frequencies of 10 Hz with a margin error 1%.

Results of modeling are given in the Fig. 5.

Basic time of modeling without CAN BUS on 6 core computer makes 105 s at real process



t – time of modeling, f_s – the frequency of sending of messages, f_r – the frequency of reception of messages

Fig. 5. Influence of parameter of counter/quantization on the frequency of sending and reception of messages and modeling time

of 470 s. According to received data CAN BUS use considerably slows down process, increasing modeling time (by 4,5 times at $chc=350$). The nature of frequency change of sending and reception of messages has an appearance of small non-linearity. At reduction of `chc` time of modeling of `t` sharply increases and it defines the choice of `chc`. At the parameter of quantization $chc=350$ the modeling Real-Time mode is reached, the transmit frequency of data at the same time makes 230 Hz. It is found out that the Real-Time mode can also it is reached by selection of a step of integration, processor frequency in the UEFI BIOS motherboard, connection of other subsystems, functions, use of newer Matlab/Simulink R2019b version working more slowly, failure from data compression; use of more difficult space model of the vehicle, application of a synchronous transfer mode.

At increase in parameter of quantization from 350 to 1000 the transmit frequency of data changes from 230 to 150 Hz. It quite enough for control of stands (100 Hz) also allows to realize further modeling at complication of model of the vehicle.

Testing of weaker 2-core computer with CAN BUS showed that its productivity is not enough for implementation of a Real-Time mode: its speed of modeling is 8.7 times less than at modern.

Frequency of data reading turns out by 1.5 times quicker than their record at the expense of a modeling process exception.

Results of modeling demonstrate that only more modern computers with CPU~4 GHz and Windows 10 can provide data transmission on CAN BUS with Simulink in Real-Time mode for difficult model. It gives diversities of calculations of subsystems between computers when using CAN BUS for a solution of complex challenges and expediency of full transition to CAN BUS despite its strong braking.

It is planned to pass completely to CAN BUS with circuit implementation in Fig. 4 with an exception of Samba network.

In a type of a difficult economic situation in Republic of Belarus it was not succeeded to realize option with the vibrostand on 6-DoF platform with the turning image on the screen (Fig. 3 on the right above).

And at development of methods of simulation modeling in a combination to bench tests of the vehicle on running drums (according to the original scheme offered by me) it is possible to investigate each element of construction and to optimize it. And an important role is played here by use of CAN BUS for information exchange.

Conclusion

1. Use of CAN BUS for data transmission in real time with Simulink on control devices on an example 6-DoF platform is considered.

2. It is established that CAN_API.dll adapter software, compiled in MVS does not work with TDM-GCC-64 because of different approach in names of the dll functions at the compiler MVS. To fix this problem recompile of dll in the TDM-GCC-64 environment which only the dll developer can execute is required.

3. The way of information compression and increase in an exchange rate twice due to byte-by-byte entering of two float values in the data field is offered. Use of identical values of identifiers is applied to two cylinders 6-DoF of a platform and the subsequent their division in the program of microcontrollers of cylinders.

4. It is revealed that CAN BUS considerably reduces modeling speed by 4,5 times. Therefore providing a modeling Real-Time mode with CAN BUS requires use of more high-speed computer (CPU ~ 4 GHz on Windows 10) and a certain mode of quantization with a modeling clock period.

5. The program of transfer/data exchange with Simulink on control devices of stands with quantization of $chc=1/350-1/1000$ from a modeling clock period is developed. It allows to realize a Real-Time mode of modeling and frequency of exchange 230, 150 Hz.

6. The optimum choice for implementation of data transmission with Simulink on stands with electroactuators on CAN BUS is use of TITAN ELECTRONICS INC adapters. They allow to realize the necessary frequency of exchange more than 100 Hz for 6-DoF platform.

REFERENCES

1. Mercedes-Benz Innovation Vehicle Developing /<https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/next/advanced-engineering/> [Electronic resource / Electronic resource] / Access mode: 22.07.2018.
2. **Emanuele Obialero** A Refined Vehicle Dynamics Model for Driving Simulators // Charhalmers University of Technology / Göteborg, Sweden 2013. Master's thesis, P. 120.
3. Customized Flight Simulator Vehicle Driving Simulation 6 Dof Motion Base Platform/<https://szfdra.en.iade-in-china.com/product/lsymbGZJbIcn/China-Customized-Flight-Simulator-Vehicle-Driving-Simulation-6-DoF-Motion-Base-Platform.html> [Electronic resource / Electronic resource]//Access mode: 22.07.2018.
4. Electric Simulation Table /<https://www.moog.com/products/simulation-tables/electric-simulation-table.html/> [An electronic resource / Electronic resource]/ Access mode: 08.09.2019.
5. Troubleshooting and Limitations Compiling C/C ++ MEX Files with MinGW-w64 https://nl.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/compiling-c-mex-files-with-mingw.html./[Electronic resource / Electronic resource]/Access mode: 08.09.2019.
6. **Mikhailov, V.G.** Use of S-Function Builder Matlab/Simulink / Systems analysis and applied information science – 2018, No. 4. P. 57–64 (on rus).
7. **Mikhailov V.G.** About some approaches of modeling of the vehicle on simulators / Systems analysis and applied information science – 2019, No. 3. P. 29–35 (on rus).
8. Usb-can user's manual 2017–07–06 edition
9. https://insat.ru/upload/iblock/da3/titan_USB-CAN%20Manual.pdf / [Electronic resource / Electronic resource]/ Access mode: 08.09.2019.
10. **Mikhailov, V.G.** Receiving and use of a uniform array of a longitudinal profile and microprofile of the road for modeling of the CU//journal of automobile engineers No. 2, 2018, P. 4–7 (on rus).

11. **Mikhailov V.G.** About oscillatory model of the truck / V.G. Mikhailov, D.V. Mishuta, //Automotive industry-2016, No. 7. P. 23–27 (on rus).

Поступила
14.10.2020

После доработки
20.02.2021

Принята к печати
01.03.2021



Mikhailov Vladimir Georgievich.

The specialist in the field of automotive industry, tests of suspenders, frames, pneumatics, hydraulics, strain-gaging, CALS/PLM development of systems (PDM, ERP) on Oracle, developments of programs on C/C ++, Java, microcontrollers, (Arduino/Raspberry), modeling of dynamic systems in the Matlab\Simulink package, estimates of the intense deformed status in the ANSYS package.

Михайлов Владимир Георгиевич.

Специалист в области автомобилестроения, испытаний подвесок, рам, пневматики, гидравлики, тензометрирования, разработки систем CALS/PLM (PDM, ERP) на Oracle, разработки программ на C/C++, Java, микроконтроллеров, (Arduino/Raspberry), моделирования динамических систем в пакете Matlab\Simulink, оценки напряженно-деформированного состояния в пакете ANSYS.

E-mail: sapr7@mail.ru

APPENDICES

Appendix A: Features of use of this adapter

For CAN BUS work it is necessary to install the USB-CAN CDM21228_Setup.exe driver in the beginning. Define what COM PORT is connected (for example, COM3). Then to start in the command line of **CAN_BAUDRATE_SET.exe COM3**. The message should be received

Searching ...

Find COM PORT: COM3

Setting every baud rate to 3Mbit ...

Set baud rate Success

testimonial of successful installation. Then it is required to disconnect an USB cable from the computer and through 5 second from again it to connect or to switch off and turn on the computer.

Note. In some cases to set CAN_BAUDRATE_SET.exe on Windows 10 64 bit it is necessary to set Properties of this file in the Compatibility mode, with noted ticks, as shown in Figure A.1. Then to execute the above-stated command.



Figure A.1. Installation of the mode of compatibility for CAN_BAUDRATE_SET.exe

Appendix B: Source text of the program of data transmission for CAN BUS

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "CAN_API.h"
#include <windows.h>
//_____
struct ds {
float a1;
float b1;
float a2;
float b2;
float a3;
float b3;
};
struct ds sf; // struct send data
struct dr {
float a1;
float b1;
float a2;
```

```

float b2;
float a3;
float b3;
};
struct dr rf; // struct read data
double stm=469.997;
int ch;
typedef TCAN_HANDLE (*FNPTR1)(CHAR *,
CHAR *, CHAR *, CHAR *, void *, DWORD);
typedef TCAN_HANDLE (*FNPTR2)
(TCAN_HANDLE);
typedef TCAN_HANDLE (*FNPTR3)(TCAN_
HANDLE, CAN_MSG*);
typedef TCAN_HANDLE (*FNPTR4)(TCAN_
HANDLE, CHAR *);
HMODULE hMod;
TCAN_HANDLE Handle;
TCAN_STATUS Status;
//-----Echange data
void sd(void)
{
byte *yf, *yf1, *yf2;
int q, nbz;
long j;
FILE *fp;
CHAR *ComPort = "COM4";
CHAR *szBitrate = "1000";
//9216000";
CHAR *acceptance_code = "1FFFFFFF";
CHAR *acceptance_mask = "00000000";
VOID *flags = CAN_TIMESTAMP_OFF;
DWORD Mode = Normal; // a debug mode
"LoopBack "
FNPTR1 CAN_Open;
FNPTR2 CAN_Close;
FNPTR2 CAN_Flush;
FNPTR3 CAN_Write;
FNPTR3 CAN_Read;
FNPTR4 CAN_Version;
FNPTR2 CAN_Status;
char version[10];
CAN_MSG SendMSG;
CAN_MSG RecvMSG;
// Handle = -1;
Status = 0;
nbz=0;
j=0;
//-----
CAN_Open = (FNPTR1) GetProcAddress(hMod,
"CAN_Open");
CAN_Close = (FNPTR2) GetProcAddress(hMod,
"CAN_Close");
CAN_Flush = (FNPTR2) GetProcAddress(hMod,
"CAN_Flush");
CAN_Write = (FNPTR3) GetProcAddress(hMod,
"CAN_Write");
CAN_Read = (FNPTR3) GetProcAddress(hMod,
"CAN_Read");
CAN_Version = (FNPTR4) GetProcAddress(h-
Mod, "CAN_Version");
CAN_Status = (FNPTR2) GetProcAddress(h-
Mod, "CAN_Status");
RecvMSG.Flags = CAN_FLAGS_STANDARD;
//EXTENDED;
RecvMSG.Size = 8;
//-----
if (ch==0)
Handle = CAN_Open (ComPort, szBitrate, accep-
tance_code, acceptance_mask, flags, Mode);
// Example read data from RecvMSG.Data
RecvMSG.Id = 0x001;
memset (version, 0, sizeof (char) * 10);
Status = CAN_Flush (Handle);
Status = CAN_Version (Handle, version);
for (j=0; j<60000; j++) {
Status = CAN_Read (Handle, &RecvMSG);
if (Status == CAN_ERR_OK) {
switch (RecvMSG.Id) {
case 1: yf=(byte *)&rf.a1; for (q=0; q<8; q++)
*yf++=RecvMSG.Data[q]; break;
case 2: yf=(byte *)&rf.a1+8; for (q=0; q<8; q++)
*yf++=RecvMSG.Data[q]; break;
case 3: yf=(byte *)&rf.a1+16; for (q=0; q<8; q++)
*yf++=RecvMSG.Data[q]; break;
default:
break;
}
fp=fopen("tc.txt", "at");
fprintf(fp, "Handle=%d ID=%X Status=%d%.
4f%.4f%.4f%.4f%.4f%.4f\n", Handle, RecvMSG.
Id, Status, rf.a1, rf.b1, rf.a2, rf.b2, rf.a3, rf.b3);
fclose(fp);
}
}
// End Example read data from RecvMSG.Data
/*
//-----
//----- Example send data into SendMSG.
Data
for (nbz=0; nbz<3; nbz++) {
yf=(byte *)&sf.a1+8*nb;

```

```
for (q=0; q<8; q++)
SendMSG.Data[q] = *yf++;
//-----
switch (nbz) {
case 0: SendMSG.Id = 0x001; break;
case 1: SendMSG.Id = 0x002; break;
case 2: SendMSG.Id = 0x003; break;
default:
break;
}
memset (version, 0, sizeof (char) * 10);
Status = CAN_Flush (Handle);
Status = CAN_Version (Handle, version);
Status = CAN_Write (Handle, &SendMSG);
if (nbz==2)
fp=fopen("tcb.txt", "at");
fprintf(fp, "Handle=%d ID=%X Status=%d%.
4f%.4f%.4f%.4f%.4f%.4f\n", Handle, RecvMSG.
Id, Status, rf.a1, rf.b1, rf.a2, rf.b2, rf.a3, rf.b3);
fclose(fp);
//-- End Example send data into SendMSG.Data
*/

if (ch==3999)
Status = CAN_Close (Handle);
} //-----End sd()
int main(void)
{
float f1, f2;
int r;
long j;
hMod = LoadLibrary ("CAN_API.DLL");
if (hMod==NULL) {
printf ("LoadLibrary failed\n");
}
for (ch=0; ch<4000; ch++)
sd();
FreeLibrary(hMod);
printf ("Test finish_FreeLibrary\n");
return 0;
}
```

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND DECISION-MAKING**

VISHNIAKOU U. A., AL-MASRI, A. H., AL-HAJI, S. K.

MODEL AND STRUCTURE OF THE NETWORK INTERNET OF THINGS FOR MONITORING MILK QUALITY

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

The quality of milk is evaluated by a number of control points, which include a number of indicators, such as fat content, protein, lactose, density, etc. It is proposed to use the Internet of things (IoT) technology to control the quality of milk from distributed dairy farms. A multi-agent model of IoT network and the structure of such an IoT network for monitoring the quality of milk from different farms is presented. The model is represented by a variety of agents: milk analyzers, converter, storage of quality indicators, their processing, decision-making, monitoring of milk quality indicators.

The structure of the IoT network includes milk analyzers, gateways-converters, a cloud platform, and mobile devices. The cloud platform rents a server that hosts knowledge and data bases, special software (solver) for processing and making decisions on milk quality, and a farm website. The database of the cloud structure server stores milk quality characteristics, and the knowledge base stores the rules for processing them. The solver outputs deviations from the current milk quality indicators from the standards. The site is used for communication of specialists in milk quality control. Monitoring of milk quality characteristics is implemented from mobile devices of specialists with access to the site components.

The 4th generation LTE network using NB-IoT technology was chosen as the network for transmitting information from dairy farms to the cloud. The review of milk analyzers of both domestic and foreign companies is carried out. A gateway solution for querying milk analyzers and transmitting parameters to the cloud infrastructure is presented. Popular cloud platforms for building a network of IoT are presented.

Keywords: *multi-agent model, milk control, IoT network structure, NB-IoT technology, cloud IoT platforms.*

Introduction

Important issues of automation of dairy production management are remote control of milk quality, which must meet international standards. One of the approaches for milk quality assessment is the calculation of indicators based on critical control points (CCP) [1]. The main indicators of milk quality can be used as such points: fat, protein, SOMO, dry matter, density, lactose, added water, etc. These metrics are collected and analyzed within a single farm using computers. Consider a more modern solution, monitoring milk quality indicators using the Internet of things (IoT). General issues of building such networks, structure, management are discussed in [2–5]. The structure of a multi-agent system for studying the quality of milk from farms in Lebanon is proposed [6]. Consider more details this approach.

IoT network models and structure

To create a model of the IoT network for monitoring milk quality (MMQ), we use a multi-agent approach [7, 8]. In this multi-agent structure, select the set of agents of the milk quality sensors, agents, converters, agents, storage quality,

processing agents milk quality indices for opinions, agents monitor these indicators and conclusions. This multi-agent model is represented by four:

$$IoTccm = \{RAM, SC, CP, MAi\},$$

where $IoTccm$ is a model of the IoT network, $Rami$ is a set of sensor agents (from portable milk quality analyzers on farms), SC is a set of converter agents (network gateways of converters), CP is a cloud platform for storing milk quality indicators (quality indicator storage agents and processing agents), and MAi is a monitoring agent (mobile devices for monitoring milk quality indicators).

Based on this model, the structure of the MMQ IoT network is developed. It is composed of portable analyzers for quality of milk from each of the monitored farms – AMQ. These analyzers usually send the results to a computer, then their output on printer via a serial port.

In our structure, these milk indicators send to the gateways-converters – GC. The latter are necessary for converting and transmitting the captured milk quality indicators to the cloud environment (CE). In the cloud environment, we

use the server. The server in CE contains data and knowledge bases, the solver, special software and website.

The database stores data obtained from farms (milk characteristics) by time (milking number, time of day, days). Data may be from different farms, possibly from different herds of cows. This data are sent to the solver (decision maker) S. It uses the rules from knowledge base for processing milk indicators receiving from the data base and produces issues solutions for certain milk quality parameters. These solutions are also recorded in the database. The site serves is as a means of displaying the results taken and obtained on the quality of milk.

Each of the specialists use mobile devices (MA), which has an application installed that allows displaying information of interest from the cloud database via the website. On a cloud server, some can install a software system to make decisions about changing the content of cows to improve the characteristics of milk quality.

Milk analyser

The milk analyzer is a device for determining the quality characteristics of milk and products based on it (fat content, density, sample acidity, lactose, sample temperature, etc.). This device does not use chemical reagents, which ensures the environmental friendliness of the studied component. Milk analyzers are used on farms, food industry enterprises, milk receiving points, and when conducting research in the field of food industry [9].

Milk analyzers have high accuracy and allow you to make a sufficient number of measurements in the required time. Currently, the use of analyzers in farms and milk processing plants is becoming a normal process.

Maximum set of measured indicators: 1. Fat; 2. Protein; 3. SOMO; 4. Dry matter; 5. Density; 6. Lactose; 7. Added water; 8. sample Temperature; 9. freezing Point; 10. Salt; 11. pH, 12. Conductivity.

Let's consider some domestic milk analyzers used in the Republic of Belarus, the characteristics of which are given in [9].

“The lactan 1–4 mini ultrasonic analyzer determines the mass fraction of fat, SOMO, added water and density in a sample of whole, fresh, canned, pasteurized, normalized and skimmed

milk. The average measurement time is 3 minutes, which is 2 times faster than using the traditional method of analysis, safer, more economical and easier. The accuracy of determining the parameters of milk quality at the same time completely corresponds to requirements of standard methods”.

“The lactane 1-4 ISP. 220 analyzer allows you to determine the six most important parameters in 180 seconds without using chemical reagents – protein, fat, SOMO, density, temperature, and mass fraction of added water in a sample of whole fresh, canned, pasteurized normalized, skimmed, reconstituted, and long-term storage milk” [9].

“The Clover-2 milk analyzer provides rapid assessment of the percentage of fat, protein, skimmed milk powder (SOMO) and density in a single sample of fresh whole, canned milk or cream. Despite the variety of functions, the Clover-2 milk quality analyzer is easy to use, which allows unskilled personnel to perform measurements on it. The main operations on the device are to fill the sample for measurement and then drain it after measurement. Select a sample and pour it into the sample receiver-all this is a matter of seconds. The process of measuring the quality of milk or cream takes 2.5–3.5 minutes. Room temperature milk is measured in 2.5 minutes, and chilled milk is measured in 3.5 minutes. The device indicator displays all the necessary information for the operator. The measurement results are displayed in digital form with a sampling rate of 0.01 %” [9].

As foreign analogues, we present the characteristics of analyzers from Bulgaria of the Lactoscan series [10]. They can be used to measure fat, solid particles (SOMO), density, protein, lactose, salt, water content as a percentage, temperature (°C), freezing point, pH, conductivity, and total solid content of the same sample immediately after milking, collection, and during processing; somatic cell counters for detecting clinical and subclinical mastitis; temperature-regulating devices for various types of tests; highly sensitive test strips for detecting adulteration of neutralizers, hydrogen peroxide and urea adulteration of raw milk that work in an efficient and reliable way.

With high accuracy and speed, Lactoscan portable ultrasonic milk analyzers are

competitive with FOSS Electric, Delta Instruments and Bentley milk analyzers, which have a much higher price. Minimal energy consumption and the absence of consumables make the Lactoscan milk analyzer attractive for the dairy industry. Low operating costs and low price make the Lactoscan milk analyzer suitable for dairy farms, dairy plants, milk sampling centers and laboratories.

Ekomilk is a range of ultrasonic milk quality analyzers produced in Bulgaria. The devices of this series have the following additional features: connecting a pH electrode to measure the activity of hydrogen ions in the test sample (displaying both the pH and titrated milk acidity values of °C), monitoring the falsification of the test whole milk by the parameter “Conductivity”, correcting the calibration of the analyzer by introducing correction values. In addition, the Ekomilk milk analyzers are equipped with a self-diagnosis system with corresponding errors displayed on the display, have an RS-232 connector for connecting to a personal computer, and the ability to connect a compact thermal printer” [10].

Gateways-converters

The end hardware (our analyzers) can use different interfaces and protocols, which makes it difficult to connect and query them with infrastructure tools in a cloud environment. In our case, the information from the analyzers can be received via parallel or serial ports. Therefore, we need gateways-converters to interact with the hardware of the cloud platform. Let’s look at possible solutions.

One of them is equipment from MOXA, which has been creating communication solutions for more than 30 years and using its experience in the field of Ethernet to COM port converters. It has developed a solution for connecting devices with a COM port to cloud environments. MOXA offers solutions for connecting COM devices directly to the cloud [11]. Let’s look at some of these converters:

“The NPort IA5000A-I/O, NPort IA-W5000A-I/O series converters and the MGate 5105-MB-EIP gateway support integration with the Alibaba Cloud IoT Platform, Azure IoT Hub, or private cloud via the MQTT Protocol.

The NPort IA5000A-I/O and NPort IA-W5000A-I/O converters allow you to transmit not

only raw data from the COM port, but also manage built-in discrete I/O channels. Data is transmitted over the MQTT Protocol in JSON format”.

IoT cloud platforms

These platforms support Internet functions for IoT applications – launch, maintenance, analytics, data storage, and security measures. Let’s consider the most famous of them [12].

“AWS IoT Core is the foundation on which any IoT application can be built. Ethrough AWS IoT Core various devices can connect to Internet, to each other and exchange data. The platform supports various communication protocols, including custom ones, which allows to communicate between devices from different manufacturers.

AWS IoT Device Management allows to add and organize devices. It provides secure and scalable performance with the ability to monitor, troubleshoot, and update device functionality. AWS IoT Analytics is designed to automatically analyze large amounts of various IoT data, including unstructured data from various types of devices. The data collected and processed by the service is ready for use in machine learning. AWS IoT Device Defender service supports configuring security mechanisms for IoT systems. AWS IoT Device Defender allows to configure and manage security policies, controlling device authentication and authorization, and providing encryption mechanisms”.

“The Google Cloud IoT platform includes a number of services that can use to create IoT networks. Cloud IoT Core is a fully managed service for easy and secure connection, as well as managing and receiving data from various devices. Cloud Pub/Sub is a service that processes event data and provides real – time flow analytics. Cloud Machine Learning Engine that allows to create machine learning models and use data collected from IoT devices” [12].

“The Microsoft Azure IoT Suite platform offers both pre-configured solutions and the ability to customize them and create new ones according to the project requirements. It can get security mechanisms, high scalability and integration with any existing or future systems. The platform allows to connect hundreds of devices from various manufacturers, collect analytical data and use IoT data for machine learning purposes”.

Organization of communication in IoT network

The communication technology recommended for this Internet of things network farm monitoring milk quality requires covering a significant distance [13]. We propose decision which is called LPWAN (Low-power Wide-area Network – energy-efficient long-range network) [14]. As a network for transmitting information from dairy farms to the cloud, we will choose the 4th generation LTE network, which has already been tested and has proven itself well in the Republic. However, it is used for Internet clients. However, its component – NB-IoT Technology, as part of LTE, has a low data transfer rate, but a large coverage thanks to the use of LTE network capabilities [15].

NB-IoT provides data transfer rates from 20 to 250 Kbit/s, depending on which LTE network resources are used. Since this is only an extension of existing standards, testing equipment and

software to verify NB-IoT compliance are already available.

Conclusion

It is proposed to use the Internet of things technology for remote monitoring and control of milk quality of dairy farms distributed throughout the district. A model of such an IoT network based on multi-agent technology is presented. The structure of this IoT network is proposed, which includes milk analyzers, gateways-converters and a cloud structure where the server platform is rented. The server components are discussed. The server database stores the quality indicators of milk. These indicators can be monitored from mobile devices of specialists.

The most popular cloud platforms are considered. The 4th generation LTE network using the technology for the IV-NB – IoT network was chosen as the network for transmitting information from dairy farms to the cloud environment.

REFERENCES

1. **Tikhomirov, I.A.** Modern technologies for managing milk quality assurance processes / I. A. Tikhomirov, V. P. Aksenova, O. L. Andriukhina // Vniimzh Bulletin. – 2018. – № 3(31). – Pp. 163–168.
2. **Roslyakov, A.V.** Internet of things: manual / A.V. Roslyakov, S.V. Vanyashin, A. Yu. Grebeshkov. – Samara: PSUTI, 2015. – 200 p.
3. Internet of things definition [Electronic resource]. – Access regime: <https://www.hpe.com/us/en/what-is/internet-of-things.html>. – Access data: 4.04.2020.
4. The Internet of Things: Today and Tomorrow [Electronic resource]. – Access regime: http://chiefit.me/wp-content/uploads/2017/03/HPE-Aruba_IoT_Research_Report.pdf. – Access data: 4.04.2020.
5. The Internet of Things (IoT) explained [Electronic resource]. – Access regime: <https://www.dbbest.com/blog/the-internet-of-things/>. – Access data: 4.04.2020.
6. **Vishniakou U.A.** Organization of management and structure in local networks internet of things / U.A. Vishniakou, A. H. Al-Masri, S. K. Al-Haji – System analysis and applied information science, 2020, № 2. – Pp. 11–16.
7. **Leyton-Brown, K.** Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations / K. Leyton-Brown, Y. Shoham. – London: Cambridge University Press. 2009. – 513 p.
8. Recommendation ITU-T T. 181203: An architecture for IoT interoperability. – Geneva: ITU-T 2018. – 25 p.
9. Analysers of milk quality [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.csm.brest.by /analizatory – kachestva-moloka>. – access date: 4.05.2020
10. Milkotronic ltd-Bulgaria-high quality milk testing [Electronic resource]. – Access mode: <https://lactoscan.com/?p=20&c=3&l=5>. – access date: 4.05.2020
11. Connect the COM port directly to the Cloud [Electronic resource]. – Access mode: <https://moxa.pro/news/new/podklyuch-aem-som-port-napryamuyu-v-oblako/>. – access date: 4.05.2020
12. Overview of the best IoT platforms in 2019. Tips for choosing a cloud solution [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.edsson.com/ru/blog/article?id=iot-platforms>. – Access date: 4.05.2020.
13. **Vishnyakou, U.A.** Technologies of intellectual multi-agent processing of information with blockchain for management systems / U.A. Vishnyakou, B. H. Sayya, A. H. Al-Masri, S. K. Al-Haji // Materials of scientific conf. OSTIS-2019. – Minsk: BSUIR, 2019. – P. 311–314.
14. **Rentiuk, V.** Brief guide to wireless technologies “Internet of things”. Part 1. Networks, gateways, clouds, and protocols // Control Engineering Russia. 2017. № 6 (72). – P. 61–65.
15. **Rentiuk, V.** Brief guide to wireless technologies “Internet of things”. Part 4. Long-range // Control Engineering Россия. 2018. № 3(75) – P. 82–87.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихомиров, И. А.** Современные технологии управления процессами обеспечения качества молока / И. А. Тихомиров, В. П. Аксенова, О. Л. Андриухина // Вестник ВНИИМЖ. – 2018. – № 3(31). – С. 163–168.

2. **Росляков, А. В.** Интернет вещей: учеб. пособие / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. – Самара: ПГУ-ТИ, 2015. – 200 с.
3. Определение Интернета вещей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hpe.com/us/en/what-is/internet-of-things.html>. – Дата доступа: 4.04.2020.
4. Интернет вещей: сегодня и завтра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://chiefit.me/wp-content/uploads/2017/03/HPE-Aruba_IoT_Research_Report.pdf. – Дата доступа: 4.04.2020.
5. Интернет вещей (ИВ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dbbest.com/blog/the-internet-of-things/>. – Дата доступа: 4.04.2020.
6. **Вишняков, В. А.** Организация управления и структуры локальной сети Интернета вещей / В. А. Вишняков, А. Х. Аль-Масри, С. К. Аль-Хаджи. – Системный анализ и прикладная информатика, 2020, № 2. – С. 11–16.
7. **Лейтон-Браун, К.** Мультиагентные системы: алгоритмические, теоретико-игровые и логические основы / К. Лейтон-Браун, Ю. Шохам. – Лондон: Из-во Кембриджского Университета. – 2009. – 513 р.
8. Рекомендация ИТУ-Т Т. 181203: архитектура для обеспечения интероперабельности Интернета вещей. – Женева: МСЭ-Т 2018. 25 с.
9. Анализаторы качества молока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.csm.brest.by /analizatory-kachestva-moloka>. – Дата доступа: 4.08.2020
10. Милкотроник Ltd – Болгария – высокое качество тестирования молока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lactoscan.com/?p=20&c=3&l=5>. – Дата доступа: 4.08.2020
11. Подключаем СОМ порт напрямую в Облако [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moxa.pro/news/new/podklyuchаем-som-port-napryamu-v-oblako/>. – Дата доступа: 4.08.2020.
12. Обзор лучших IoT платформ в 2019 году. Советы по выбору облачного решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edsson.com/ru/blog/article?id=iot-platforms>. – Дата доступа: 4.08.2020.
13. **Вишняков, В. А.** Технологии интеллектуальной многоагентной обработки информации с блокчейн для систем управления / В. А. Вишняков, Б. Х. Сайя, А. Х. Аль-Масри, С. К. Аль-Хаджи // Сборник научных трудов ОСТИС-2019. – Минск: БГУИР, 2019. – С. 311–314.
14. **Рентюк, В.** Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 1. Сети, шлюзы, облака и протоколы // Control Engineering Россия. 2017. № 6. – С. 61–65.
15. **Рентюк, В.** Краткий путеводитель по беспроводным технологиям «Интернета вещей». Часть 4. Дальний радиус действия // Control Engineering Россия. 2018. № 3(75). – С. 82–87.

Поступила
12.04.2020

После доработки
21.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

ВИШНЯКОВ В. А., АЛЬ-МАСРИ А. Х., АЛЬ-ХАДЖИ С. К.

МОДЕЛЬ И СТРУКТУРА СЕТИ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА МОЛОКА

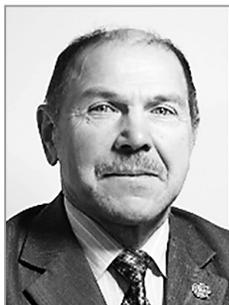
*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь*

Качество молока оценивается рядом контрольных точек, в качестве которых приведены ряд показателей, таких как жирность, белок, лактоза, плотность и т. д. Для контроля качества молока распределенных молочных хозяйств предложено использовать технологию интернет вещей (ИВ). Представлена многоагентная модель сети ИВ и структура такой сети ИВ для контроля качества молока от различных хозяйств. Модель представлена множеством агентов: анализаторов молока, преобразователей, хранения показателей качества молока, их обработки, принятия решений, мониторинга показателей качества молока.

Структура сети ИВ включает анализаторы молока, шлюзы-преобразователи, облачную платформу, мобильные устройства. В облачной платформе арендуется сервер, на котором расположены базы знаний и данных, специальное ПО (решатель) по обработке и принятию решений по качеству молока, сайт ферм. В базе данных сервера облачной структуры хранятся характеристики качества молока, в базе знаний – правила их обработки. Решатель выдает отклонения по текущим показателям качества молока от стандартов. Сайт служит для связи специалистов по контролю качества молока. Мониторинг характеристик качества молока реализуется с мобильных устройств специалистов, доступом к компонентам сайта.

В качестве сети передачи информации с молочных ферм в облачную среду выбрана сеть 4-го поколения LTE с использованием технологии NB-IoT. Проведен обзор анализаторов молока как отечественных, так и зарубежных компаний. Представлен вариант решения по шлюзу для опроса анализаторов молока и передачи параметров в облачную инфраструктуру. Представлены облачные популярные платформы для построения сети ИВ.

Ключевые слова: мультиагентная модель, контроль молока, структура сети ИВ, технология NB-IoT, облачные платформы.



Vishniakou Uladzimir. – doctor of technical science, professor of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Research interest: information management and security, electronic business, intellectual management systems. Author more 440 scientific publications including 6 monographs (1 – English), 4 study books with stamp of education Ministry, 8 volumes manual «Information management».

Вишняков Владимир Анатольевич – д.т.н., профессор БГУИР, каф. ИКТ. Область научных интересов: информационное управление и безопасность, электронный бизнес, интеллектуальные системы управления. Автор более 440 научных работ, в том числе 6 монографий (1 на английском языке), 4-х

учебных пособий с грифом Министерства образования, 8-и томного учебного комплекса «Информационный менеджмент».

e-mail: vish2002@list.ru

Al-Masri, A. H., – master of technical science, PhD-student of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Аль-Масри А. Х. – магистр технических наук, аспирант кафедры ИКТ БГУИР.

Al-Haji, S. K. – master of technical science, PhD-student of ICT department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Аль-Хаджи С. Х. – магистр технических наук, аспирант кафедры ИКТ БГУИР.

ЖУК А. А., БУЛОЙЧИК В. М.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОГО РЕСУРСА

Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Данная статья посвящена особенностям решения задачи целочисленного нелинейного программирования, с помощью разработанного нейросетевого метода и алгоритма нелинейной оптимизации средства «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel. В предлагаемом нейросетевом методе решение поставленной задачи производится посредством рекуррентной нейронной сети (РНС) матричной архитектуры с t нейронами в каждой строке и n нейронами в каждом столбце. Все нейроны такой сети соединены друг с другом связями, причем сигнал с выхода нейрона может подаваться на его же вход. Нейросетевой метод характеризуется тем, что на входы упомянутой РНС подается входной вектор значений параметров оптимизируемой нелинейной целевой функции задачи распределения неоднородного ресурса, осуществляется расчет значений весовых коэффициентов связанных между собой нейронов и формируется сигнал РНС. Этот сигнал посредством нелинейной функции преобразуется в дискретный выходной сигнал, характеризующий значения квазиоптимального решения упомянутой задачи, величина которого изменяется от 0 до 1. Оценка эффективности решения рассматриваемой задачи выполняется при ее различных значениях показателя эффективности на основе разработанной имитационной модели РНС. В качестве показателей эффективности применения предлагаемого нейросетевого метода использовались – средняя относительная ошибка и время решения задачи. За точное решение принималось значение, полученное с помощью алгоритма нелинейной оптимизации средства «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel. Анализ полученных результатов экспериментальных исследований, предложенного нейросетевого метода, позволил сделать заключение о том, что в сравнении с существующим методом нелинейной оптимизации табличного процессора Microsoft Excel использование предлагаемого нейросетевого метода позволяет существенно (в 9,4 раза) снизить время решения задачи размерностью 10×8 ($t \times n$) и при этом обеспечить точность ее решения не менее чем 99,8%.

Ключевые слова: целочисленное нелинейное программирование, комбинаторная оптимизация, нейросетевая оптимизация, квазиоптимальное распределение, нейросетевой метод, рекуррентная нейронная сеть, оценка эффективности.

Введение

На практике часто встречаются задачи, целью которых является поиск оптимального варианта распределения некоторого ресурса. Примерами таких задач являются: распределение огневых средств ПВО по средствам воздушного нападения противника при максимизации числа уничтоженных целей в налете; распределение неоднородных сил по районам действий для максимизации полной вероятности обнаружения цели и т.д. При этом целевая функция $U(x)$ и система ограничений таких задач имеют следующий вид

$$U(x) = \sum_{i=1}^m c_j \left[1 - \prod_{j=1}^n (1 - p_{ij} x_{ij}) \right] \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m, \\ x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, \end{cases} \quad (2)$$

где m, n – константы, предопределяющие размерность задачи (сложность);

c_j – константа, определяющая важность j -го мероприятия;

p_{ij} – значение показателя эффективности i -го средства при выполнении j -го мероприятия;

x_{ij} – параметр, принимающий значение 1, если i -е средство назначается для выполнения j -го мероприятия, и 0, если i -е средство не назначается.

Формализация задачи в виде целевой функции (1) и системы (2) представляет

собой задачу целочисленного нелинейного программирования.

Для решения подобных задач вообще и задачи распределения в частности используются различные точные и приближенные методы комбинаторной оптимизации. В большинстве случаев, методом, гарантирующим нахождение оптимального решения, является полный перебор всех возможных вариантов. Однако множество вариантов допустимых решений таких задач быстро растет с увеличением размерности входных данных, что делает на практике неприемлемым использование метода полного перебора.

Тем не менее, во многих областях деятельности, и особенно в военной, часто необходимо оперативно решать задачи рассматриваемого класса. При этом приближенное решение задачи, полученное в приемлемое время, более ценно, чем точное решение, найденное через недопустимый интервал времени. Данное обстоятельство и стимулировало развитие

различных приближенных методов решения комбинаторно-оптимизационных задач, среди которых наибольший интерес (с точки зрения рассматриваемой задачи) представляют нейросетевые методы.

Теоретические аспекты использования нейросетевого метода на основе рекуррентной нейронной сети матричной архитектуры

В рамках военно-научной школы «Современные методы и средства математического моделирования военных действий и военно-технических систем» для решения комбинаторно-оптимизационных задач был разработан нейросетевой метод на основе рекуррентной нейронной сети (РНС) матричной архитектуры [1–3]. Для рассматриваемого метода наиболее близким по реализации является метод на основе нейронной сети Хопфилда [4]. Основные отличия данных сетей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Отличительные особенности нейронных сетей

Нейронная сеть Хопфилда	Рекуррентная нейронная сеть матричной архитектуры
Сигнал на входы нейронов с их выходов не подается	На входы нейронов подается сигнал с их выходов
Размерность сети для решаемой задачи определяется симметричной матрицей $n \times n$	Размерность сети для решаемой задачи определяется матрицей $m \times n$
При начальной инициализации весовых коэффициентов нейронов входной сигнал определяется значением вектора параметров целевой функции решаемой задачи	При начальной инициализации на входы нейронов подаются дополнительные параметры, характеризующие ограничения решаемой задачи

Указанные в таблице 1 особенности позволяют:

- на основе сети Хопфилда решать задачи комбинаторной оптимизации только с учетом ограничений, накладываемых на саму целевую функцию с симметричной матрицей эффективности;

- на основе матричной РНС при решении задачи комбинаторной оптимизации дополнительно учитывать ограничения в виде системы линейных уравнений.

Для решения задачи, учитывающую формализацию (1) и (2) предлагается архитектура матричной РНС (рис. 1), которая является разновидностью РНС, описанной в [3].

Решение задачи с помощью данной сети основано на установлении соответствия между функцией $E(w)$ вычислительной энергии РНС и целевой функцией (1). Выразив весовые

коэффициенты w нейронов РНС через параметры x решаемой задачи, имеется возможность за время переходных процессов в сети найти квазиоптимальное решение.

Пример перехода нейронов РНС в устойчивое состояние представлен на рис. 2.

На рис. 2 представлены два фрагмента одной области (двумерный массив) оперативной памяти (ОП) ПЭВМ при отладке имитационной модели РНС в среде программирования Borland C++ Builder. Здесь состояния нейронов РНС обозначены 1 или 0. Первый фрагмент ОП (рис. 2а) демонстрирует состояние нейронов РНС в начале переходного процесса. Через k итераций РНС приходит в устойчивое состояние (рис. 2б). При этом полученные значения выходов y_{ij} активных нейронов (рис. 1) образуют искомым результат целевой функции (1).

где y_{ij}^k – значение состояния нейронов сети на k -й итерации;

u_0 – коэффициент, принимающий значения в диапазоне $(0...1]$ и влияющий на скорость перехода РНС в устойчивое состояние и точность решения.

В этом случае формируемый РНС сигнал посредством нелинейной функции преобразуется в дискретный выходной сигнал, величина которого изменяется от 0 до 1 (рис. 2).

Алгоритм нейросетевого метода решения рассматриваемой задачи на основе предлагаемой РНС (рис. 1) включает в себя следующую последовательность действий:

1. Первоначальные состояния ($k = 0$) всех нейронов сети y_{ij}^k проинициализировать значениями коэффициентов p_{ij} целевой функции (1). При этом необходимо значения коэффициентов p_{ij} , лежащие в произвольном диапазоне преобразовать к диапазону $[0 \div 1]$.

2. Значения синоптических связей w_{ij}^k (при $k = 0$) всех нейронов сети установить равными значениям величины θ_{ij} вычисляемой согласно выражению

$$\theta_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{при } p_{ij} \geq 0,7; \\ 0, & \text{при } p_{ij} \leq 0,2; \\ p_{ij}, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

3. Выполнить модификацию выходных значений передаточной функции для всех нейронов сети в соответствии с выражением (4), в котором значения y_{ij}^k определяются по формуле

$$y_{ij}^k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}^{k-1} + \lambda dy_{ij}^k, \quad (6)$$

где λ – коэффициент, характеризующий шаг изменения энергетической функции (3), что влияет на скорость сходимости итерационного процесса изменения состояний нейронов и, соответственно, на точность и время определения локального (глобального) экстремума;

dy_{ij}^k – значение изменения состояния нейронов сети на k -й итерации, определяемое согласно выражению

$$dy_{ij}^k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (-y_{ij}^{k-1} + e_1 + e_2 + e_3), \quad (7)$$

где e_1, e_2, e_3 – значения, определяющие требования при минимизации функции энергии сети (3).

Здесь

$$e_1 = -\gamma_1 \left[\sum_{i=1}^m (w_{ij}^{k-1} - 1) \right]; j = \overline{1, n}; \quad (8)$$

выражение (8) учитывает требование не более одного средства назначения;

$$e_2 = -\gamma_2 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_{ij}^{k-1} - m) \right]; \quad (9)$$

выражение (9) удовлетворяет требованию ровно m единиц в матрице;

$$e_3 = -\gamma_3 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_j p_{ij} w_{ij}^{k-1} \right]; \quad (10)$$

выражение (10) максимизирует целевую функцию (1);

4. Проверка состояния нейронов сети: если состояние нейронов сети не меняется и находится в области допустимых решений, то итерационный процесс в РНС завершается, иначе переход к шагу 3.

Зависимость функции энергии сети E от весовых коэффициентов нейронов w предлагаемого метода носит немонотонный характер. Это объясняется наличием множества локальных минимумов функции энергии сети. Из-за наличия многих локальных экстремумов и с увеличением сложности задачи РНС не всегда приходит в устойчивое состояние, и становится не возможным, получить решение за конечное число итераций. Для улучшения сходимости решения, в алгоритме предлагаемого нейросетевого метода на завершающих итерациях дополнительно выполняется расчет, при котором в активное состояние ($y_{ij} = 1$) устанавливается нейрон с наибольшим выходным значением в строке, а остальные нейроны делаются неактивными ($y_{ij} = 0$).

Условия проведения экспериментальных исследований

Для исследования нейросетевого метода решения рассматриваемой задачи была разработана и реализована в среде программирования Borland C++ Builder имитационная модель РНС (рис. 3).

В качестве примера применения РНС рассматривалось решение следующей задачи. Имеется восемь районов поиска ($n = 8$), в одном из которых находится цель. Априорная вероятность нахождения цели c_j в каждом j -м

районе равна единице ($c_1 = c_2 = \dots = c_8 = 1$). Требуется распределить десять разнородных поисковых единиц ($m = 10$) по районам так, чтобы полная вероятность обнаружения цели была максимальной. При этом каждая из

поисковых единиц должна обязательно назначаться на какой-либо из районов поиска.

Вероятности обнаружения цели p_{ij} различными поисковыми единицами в каждом из районов заданы матрицей (рис. 4).

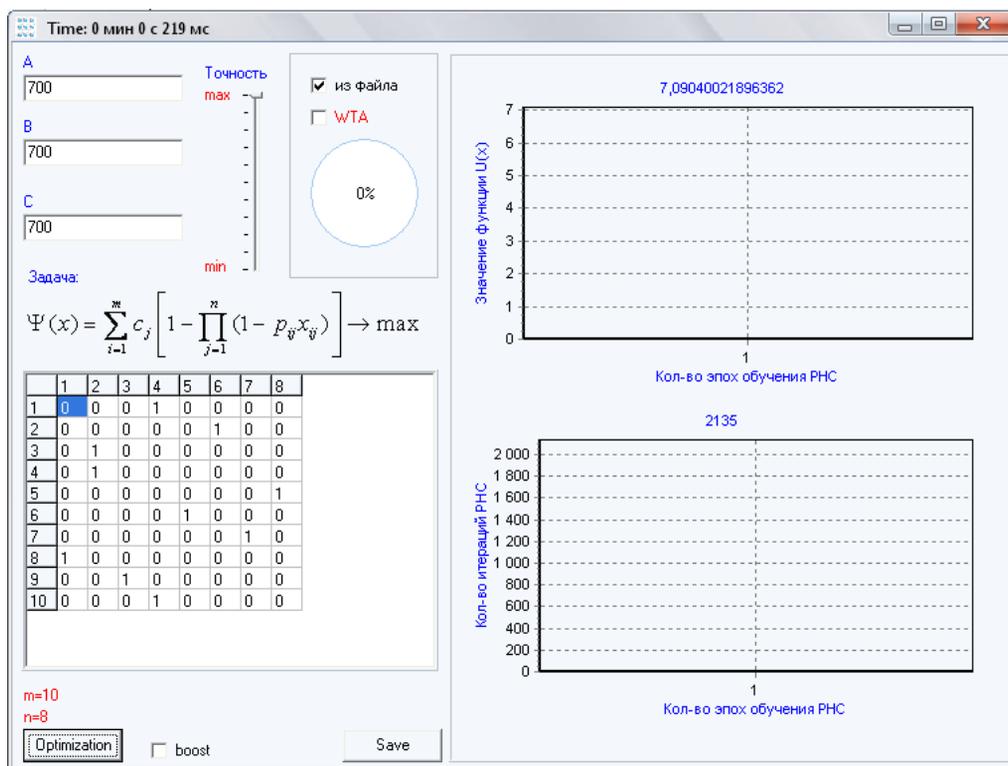


Рис. 3. Интерфейс программной реализации РНС матричной архитектуры

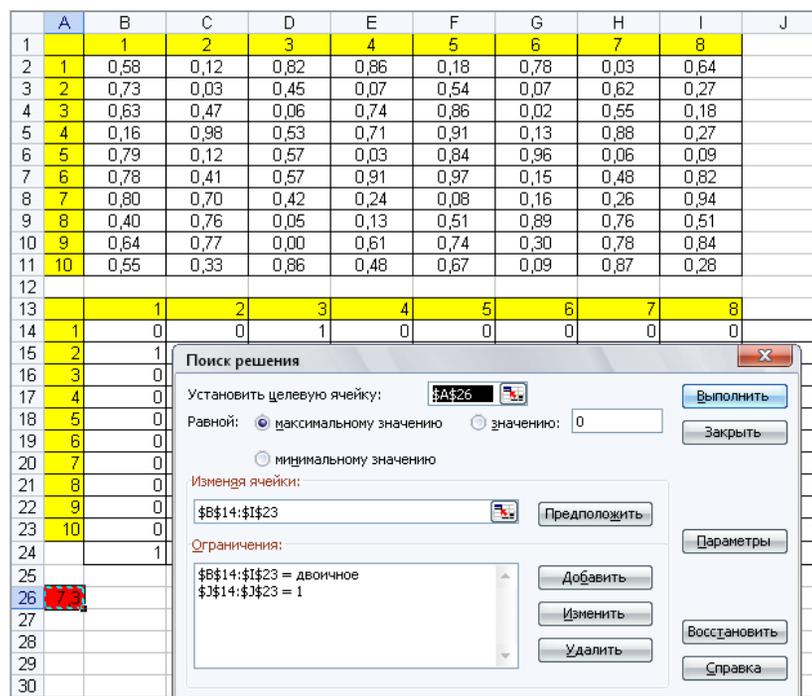


Рис. 4. Исходные данные и ограничения для поиска решения задачи комбинаторной оптимизации с помощью табличного процессора Microsoft Excel

На рисунке 4, в диапазоне ячеек $[B_2, C_3, \dots, I_{11}]$ таблицы Microsoft Excel, записаны значения условной вероятности обнаружения цели p_{ij} i -ой поисковой единицей в j -м районе. В окне «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel (рис. 4) представлены максимизируемая целевая функция (1) и ограничения (2) задачи.

Оценка эффективности применения нейросетевого метода в задаче рационального распределения разнородных поисковых единиц

Оценка эффективности решения задачи предлагаемым нейросетевым методом выполнялась при различных исходных данных условной вероятности обнаружения p_{ij} ($p_{ij} \in [0 \div 1]$), а сложность задачи определялась размером 10×8 ($m \times n$). При этом параметры РНС, соответствующие размерности (сложности) задачи задавались в соответствии с таблицей 2.

В качестве показателей эффективности применения РНС использовались: средняя относительная ошибка Δ и время решения задачи t .

Показатель эффективности Δ РНС вычисляется согласно выражению

$$\Delta = \frac{U(\bar{x}) - U_t(\bar{x})}{U_t(\bar{x})} \cdot 100\%, \quad (11)$$

Таблица 2.

Параметры рекуррентной нейронной сети

Количество нейронов сети, шт.	80
Функция активации нейронов	Гипертангенс
Значение коэффициента функции активации нейронов u_0 [4]	0,02
Значения коэффициента скорости изменения состояния сети и точности вычислений сети λ	1×10^{-7}
Значения коэффициентов ограничений $\gamma_1 - \gamma_3$ функции энергии сети $E, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3$	700

где $U(\bar{x})$ – расчетное значение целевой функции (1) от вектора параметров с помощью РНС;

$U_t(\bar{x})$ – точное (оптимальное) значение целевой функции (1) полученное от вектора параметров \bar{x} .

За точное решение принималось значение, полученное с помощью алгоритма нелинейной оптимизации средства «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel (рис. 4).

Результаты применения рассматриваемых методов для 14 первых реализаций случайно сгенерированных значений матриц условных вероятностей обнаружения p_{ij} представлены в табл. 3.

Анализ таблицы 3 показывает, что среднее время решения задачи для нейросетевого метода составило 245 мс, а для средства «Поиск

Таблица 3. Результаты решения задачи нелинейной оптимизации

№ реализации	Методы решения			
	Алгоритм нелинейной оптимизации средства «Поиск решения» табличного процессора Microsoft Excel		Нейросетевой метод на основе РНС матричной архитектуры	
	Показатели эффективности решения задачи			
	Время решения задачи t , мс	Максимальное значение целевой функции $U_t(x)$	Время решения задачи t , мс	Максимальное значение целевой функции $U(x)$
1	1150	7,1	204	7,13
2	1150	7,4	641	7,33
3	2300	6,8	78	7,01
4	2300	7,16	125	7,11
5	2300	7,35	125	7,31
6	2300	7,55	125	7,44
7	2300	7,1	156	7
8	2300	7,1	641	6,98
9	2300	6,96	187	7,11
10	3600	7,09	219	7,06
11	2300	7,04	157	7,01
12	2300	7,33	250	7,23
13	2300	7,15	125	7,1
14	3400	7,19	406	7,29

решения» табличного процессора Microsoft Excel – 2307 мс. Среднее значение целевой функции (1) для нейросетевого метода – 7,16, для метода нелинейной оптимизации приложения Microsoft Excel – 7,17.

Заключение

Таким образом, решение задачи целочисленного нелинейного программирования нейросетевым методом дает более быстрое решение. Его использование для задачи размерностью 10×8 позволило уменьшить время решения в 9,4 раза и обеспечить точность не менее чем 99,8% (с относительной ошибкой не более 0,2%). При этом, максимальная практически возможная ошибка ξ , допущенная с доверительной вероятностью 0,9 при определении средней ошибки решения, составила 7,7%. Как показывают расчеты, для уменьшения максимальной практической допущенной ошибки результатов исследования до 5% требуется число примеров (реализаций) увеличить, как минимум в 2,5 раза.

Сравнивая полученные результаты с результатами, приведенными в [3], можно сделать вывод, что использование предлагаемой РНС матричной архитектуры одинаково эффективно, как при решении задач целочисленного линейного программирования (комбинаторной оптимизации), так и целочисленного нелинейного программирования. Алгоритм

рассматриваемого нейросетевого метода слабо зависит от нелинейности целевой функции и функций системы ограничений. Это обусловлено дискретной формой выходного сигнала нейронов, получаемой посредством нелинейной функции их активации. В тоже время, существующие методы решения задач целочисленной нелинейной оптимизации обладают более значительной вычислительной сложностью перед задачами целочисленной линейной оптимизации. Так, в сравниваемых результатах, с требуемой для практики точностью, использование РНС позволило сократить время решения в 9,4 раза – для задачи нелинейной комбинаторной оптимизации со сложностью 10×8 , а для задачи линейной комбинаторной оптимизации в 11 раз, но уже для сложности 25×36 .

Следует также отметить, что динамика РНС состоит в многократном циклическом пересчете матрицы весовых коэффициентов и заданных ограничений сети, при котором к каждому элементу матрицы применяется одинаковый набор процедур. Все это дает возможность реализации параллелизма и ускорения вычислений РНС при обработке данных на ПЭВМ. Например, такие вычисления могут быть распараллелены на графическом процессоре с применением технологии CUDA [6]. По предварительной оценке это позволит дополнительно сократить время решения задачи от 10 до 30 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ динамической обработки данных при решении задачи комбинаторной оптимизации: пат. BY 21989 / А. А. Жук, В. М. Булойчик. – Оpubl. 13.03.2018.
2. **Жук, А. А.** Оптимизация распределения ресурсов посредством рекуррентной нейронной сети / А. А. Жук, В. М. Булойчик // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 2. – С. 62–70.
3. **Жук, А. А.** Эффективность решения задачи распределения ресурсов искусственной нейронной сетью / А. А. Жук, В. М. Булойчик // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2018. – № 2. – С. 26–32.
4. **J. J. Hopfield, D. W. Tank.** «Neural» Computation of Decisions in Optimization Problems // Biological Cybernetics. – 1985. – № 52. – P. 141–152.
5. **Булойчик, В. М.** Решение транспортной задачи на электронной карте местности с помощью искусственных нейронных сетей / В. М. Булойчик, Д. М. Скрипко // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.–техн. наук. – 2007. – № 1. – С. 104–110.
6. **Сандерс, Дж.** Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров / Дж. Сандерс, Э. Кэндрот. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 232 с.

REFERENCES

1. Sposob dinamicheskoi obrabotki dannyh pri reshenii zadachi kombinatornoj op-timizatsii: pat. BY 21989 / A. A. Zhuk, V. M. Bulochyk. – Opubl. 13.03.2018.
2. **Zhuk, A. A.** Optimizatsiya raspredeleniya resursov posredstvom rekurrentnoi neironnoi seti / A. A. Zhuk, V. M. Bulochyk // Vestn. Voen. akad. Resp. Belarus'. – 2016. – № 2. – S. 62–70.
3. **Zhuk, A. A.** Effektivnost' resheniya zadachi raspredeleniya resursov iskusstvennoi neironnoi set'yu / A. A. Zhuk, V. M. Bulochyk // Vestn. Voen. akad. Resp. Belarus'. – 2018. – № 2. – S. 26–32.

4. **J. J. Hopfield, D. W. Tank.** «Neural» Computation of Decisions in Optimization Problems // Biological Cybernetics.– 1985.– № 52.– P. 141–152.
5. **Buloichyk, V. M.** Reshenie transportnoi zadachi na elektronnoi karte mestnosti s pomosh'yu iskusstvennykh neironnykh setei / V. M. Buloichyk, D. M. Skripko // Vestsi NAN Belarusi. Ser. fiz.– tehn. navuk.– 2007.– № 1.– S. 104–110.
6. **Sanders, Dzh.** Tehnologiya CUDA v primerakh: vvedenie v programmirovaniye graficheskikh protsessorov / Dzh. Sanders, E. Kendrot.– M.: DMK Press, 2013.– 232 s.

Поступила
06.12.2020

После доработки
20.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

ZHUK A. A., BULOICHYK V. M.

NEURAL NETWORK METHOD OF THE DECISION OF THE NONLINEAR PROBLEM OF OPTIMUM DISTRIBUTION OF THE NON-UNIFORM RESOURCE

Military academy Republic of Belarus

Given article is devoted features of the decision of a problem of integer nonlinear programming, by means of developed neural network method and algorithm of nonlinear optimization of means «decision Search» tabular processor Microsoft Excel. In offered neural network method the task in view decision is made by means of a recurrent neural network (RNN) matrix architecture with m neurons in each line and n neurons in each column. All neurons such network are connected with each other by communications, and the signal from an exit neuron can move on its input. Neural network method is characterized by that on inputs mentioned RNN the entrance vector of values of parameters of optimized nonlinear criterion function of a problem of distribution of a non-uniform resource moves, calculation of values of weight factors connected among themselves neurons is carried out and signal RNN is formed. This signal by means of nonlinear function will be transformed to the discrete target signal characterizing values quasi-optimal of the decision of the mentioned problem which size changes from 0 to 1. The estimation of efficiency of the decision of a considered problem was carried out at its various values of an indicator of efficiency on the basis of developed imitating model RNN. As indicators of efficiency of application offered neural network method were used – an average relative error and time of the decision of a problem. The value received by means of algorithm of nonlinear optimization of means was accepted to the exact decision «decision Search» tabular processor Microsoft Excel. The analysis of the received results of the experimental researches, offered neural network method, has allowed to make the conclusion that in comparison with an existing method of nonlinear optimization of tabular processor Microsoft Excel use offered neural network method allows essentially (in 9,4 times) to lower time of the decision of a problem dimension 10×8 ($m \times n$) and thus to provide accuracy of its decision not less than 99,8%.

Keywords: integer nonlinear programming, combinatory optimization, neural network optimization, quasi-optimal distribution, neural network method, a recurrent neural network, efficiency estimation.



Жук Андрей Александрович, доцент, кандидат технических наук, область научных интересов – системный анализ, методы математического программирования, методы и алгоритмы нейросетевой технологии обработки информации.

Zhuk A. A., PhD, associate professor, deputy head of the Department of Information and computing systems, Military academy Republic of Belarus.

E-mail: k210@tut.by.



Булойчик Василий Михайлович, профессор, доктор технических наук, основное направление научной деятельности – разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированных систем управления, компьютерных военных игр и тренажных систем; разработка методов нейросетевой обработки информации и их применение в системах военного назначения.

Buloichyk V. M., Doctor of technical sciences, professor, head of Research laboratory of modeling military actions, Military academy Republic of Belarus.

E-mail: vas-mih@tut.by.

D. A. KECHIK, Y. P. ASLAMOV, I.G. DAVYDOV

METHOD OF ESTIMATION OF FREQUENCY VARIATION RELYING ON ESTIMATION OF SHIFT OF SPECTRAL PEAKS

Belarussian state university of informatics and radioelectronics

Problem of estimation of varied frequency of components of polyharmonic signals has been arose. Three-dimensional time-frequency representation of signals is usually used to resolve this problem. But simple and reliable method of instantaneous frequency tracking is needed. Frequency tracking method based on estimation of shifts of peaks of spectrogram has been proposed in this paper. It is assumed that shift of spectral peaks of components of signal is proportional to variation of fundamental frequency. Logarithmic scaling of time-frequency representation is used to make spectral peaks equidistant. Temporal dependence of shift of spectral maximums is obtained using correlation of windowed spectrum at the first frame and spectrum of signal in the current window. Then obtained track is translated in linear scale. Proposed method does not estimate values of instantaneous frequency or central frequency of signal component but estimates its variation. Advantage of the method is that it can estimate frequency track even if range of frequency variation and its central value are known roughly or unknown at all. Multiple components do not interfere to estimate fundamental frequency variation. Reduction of bandwidth is recommended to increase accuracy of frequency track estimation, but analysis of time-frequency representation containing a few components is also possible. Dependency of performance of analysis of synthetic signals using the method on various signal to noise ratios under different conditions was estimated. Applicability of the method for vibrational diagnosing of rotary equipment was checked out using spectral interference method.

Keywords: *instantaneous frequency, wavelets, spectrogram, correlation function, frequency tracking, frequency estimation, fundamental frequency*

Introduction

Processing of non-stationary signals is complicated because the most convenient representation of speech [1], vibrational and vibration envelope signals [2, 3] is polyharmonic. Frequencies of components of machinery vibration at low frequencies and components of envelope of vibration

are dependent unambiguously on shaft rotation speed [2, 3], and their instantaneous frequencies (IF) are proportional too [4]. Frequency track is used to resample signal with equiangular step [5] and obtain spectrums that are suitable to processing by convenient methods. Result of such operation was demonstrated at Fig. 1. Components of

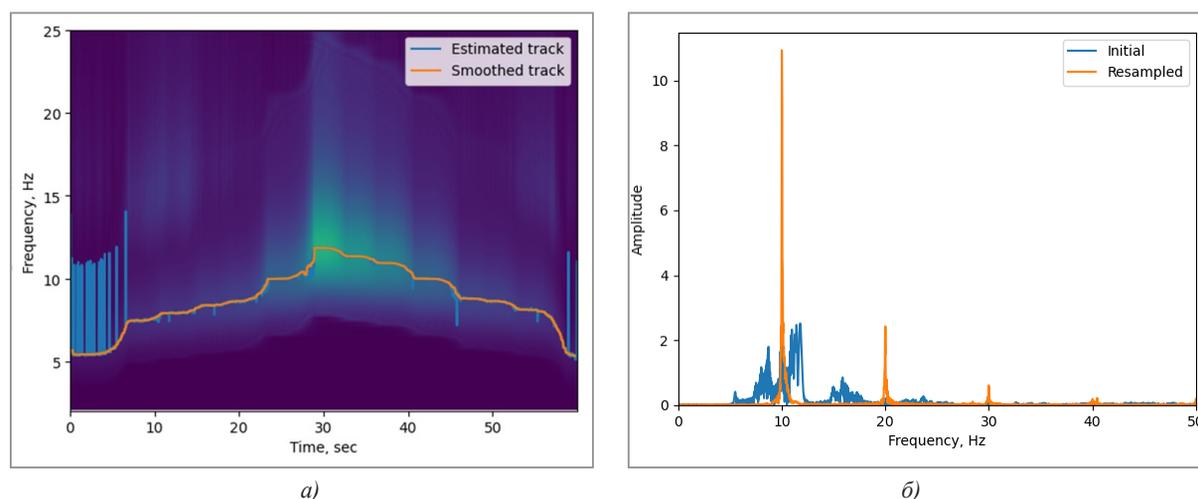


Fig. 1. Vibrational signal observed under widely varying speed conditions:

a) – spectrogram and estimated frequency track; b) – spectrum of initial and resampled signals

signal whose frequency was widely varied were smeared, components of resampled signal are almost discrete in frequency domain.

Hardware tracking techniques are usually used to eliminate speed varying [6–12]. Time-frequency signal processing methods may be used to estimate frequency track relying on signal. The most obvious approach is to filtrate signal at spectral areas containing the most of energy of signal (e.g. peaks of scalogram, smoothed power spectrum [13]) and compute IF of selected component, but it has been shown to be ineffective [14] and it is not applicable when components are intersected in frequency domain due to high (two times and more) frequency deviation. Alternative approach is segmented autoregression method [14, 15]. It is reliable at low SNR and rapid variations of frequency. Drawbacks of this method are runouts and not smooth track, that may be partially compensated by median smoothing (Fig. 1, a) [15].

Proposed method

In this paper frequency tracking method based on estimation of shift of spectral peaks is proposed. The signal is assumed to be polyharmonic and satisfy the model:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) \cos(n\omega(t)t + n\phi(t)).$$

Let fundamental frequency (FF, shaft rotation frequency of vibration signal or the first harmonic otherwise) $\omega(t)$ be varied in time. Then we cannot restore it relying on spectrum of signal (Fig. 1b). If signal is supposed to be stationary at short window, we can obtain spectrum of signal at short windows that are generally weighted and overlapped. Short time Fourier transform is commonly used procedure. Time-frequency representation (TFR) may be obtained by equivalent methods (wavelet transform, filter banks). STFT and DFT-modulated filter banks were trialed in this paper (Fig. 3a). TFR was obtained using STFT as modulus of complex valued spectrogram computed using ‘*spectrogram*’ function of MatLab package. The other approach assumes decomposition of signal using DFT-modulated filter bank (inverse FFT of windowed complex spectrum). Window function was Fourier spectrum of MORL wavelet [16] with central frequency equal to center of each frequency channel [14, 15]. Then signal at each frequency channel was substituted by its envelope (modulus of analytical signal).

TFR may be treated as instantaneous spectrum: its samples $S(t, f)$ at fixed time moment t evaluates amplitudes of each component at this moment (while $S(f)$ denotes overall spectrum). If instantaneous FF is changed at the next time moment, all spectral peaks will shift proportionally [4]. Frequency axis of TFR is recommended to be logarithmic scaled to make spectral peaks be equidistant [17]. Then, multiplicative coefficients of frequencies of components become additive. One can express IF of any harmonic as product of initial value of FF f_1 , harmonic number k and frequency shift $s(t)$:

$$\begin{aligned} \log_{basis}(f_k(t)) &= \log_{base}(s(t) \cdot k \cdot f_1) = \\ &= \log_{base}(s(t)) + \log_{base}(k) + \log_{base}(f_1) = (1) \\ &= s_{log}(t) + \log_{base}(k) + \log_{base}(f_1), \end{aligned}$$

where *base* is empirically selected base of the logarithm. Then distance between IF of any two consequent components is preserved the similar:

$$\log_{base}(f_{k+1}(t)) - \log_{base}(f_k(t)) = \log_{base}(k). \quad (2)$$

Finding maximum of cross-correlation function (CCF) is conventionally used method to estimate shift between two signals of similar shape. Shift of frequencies of components of signal at each time moment is proposed to be estimated as lag of CCF of spectrums at the first time moment and at the current moment:

$$CCF(f_l, f_h, t, \theta) = \int_{f_l}^{f_h} S(t, f) \cdot S(0, f - \theta) df, \quad (3, a)$$

$$\hat{s}_{log}(t) = \arg \max_{\theta} CCF(f_l, f_h, t, \theta), \quad (3, b)$$

where θ is lag of correlation function, $f_l \dots f_h$ are frequency limits of TFR, hat over variable means its estimated value.

Positions of maximums of correlation functions indicate shift of all peaks of amplitude spectrum in log-frequency domain expressed in samples and then variation of fundamental frequency. Values of logarithmic track $s_{log}(t)$ of FF at each i -th time moment were estimated as frequencies according to lags of maximums of $CCF(f_l, f_h, t, \theta)$ according to (3b). Then logarithmic track was translated to linear using formula: $\hat{s}(t) = basis^{\hat{s}_{log}(t) \cdot df_{Log}}$, where df_{Log} is uniform spacing interval in logarithmic scale. Obtained track denotes variation of instantaneous FF, times. It is appropriate to get frequency track estimation in per cents:

$$\hat{s}_\% (t) = (s(t) - 1) \cdot 100\% . \quad (4)$$

Relation of power of periodical component of analyzed signal to wideband noise power (Signal to Noise Ratio, SNR) enhances due to low correlations of noise [18]. To maximize SNR, preliminary selection of band limits is necessary. For vibrational signals a few harmonics of shaft rotation frequency and gear mesh frequency are recommended to use because they are the most prominent usually. Then, spectrogram is computed at frequencies defined by analysis of spectrograms of signals ensemble. Spectral representation of ideal polyharmonic signal and.

Additive white Gaussian noise is uniform spectrum with weighted deltas at multiple frequencies. Then, noise power may be estimated as integral of squared noisy samples in assigned band, signal power may be computed as sum of squared differences between amplitude of spectral peak and averaged noise level in the peaks vicinity. Thus, we can roughly define appropriate band limits through probable range of deviation of FF harmonics. Let us express local SNR through harmonics number i :

$$SNR_{local,times} (i) = \frac{[\sum_{f=f_0}^{i \cdot f_0} \langle \overline{N(f)} \rangle^2]}{[\sum_{k=1}^i \langle \overline{S(k \cdot f_0)} \rangle^2]} \approx \frac{\langle \overline{N_{low}} \rangle^2 \cdot ((i-1) \cdot f_0)}{[\sum_{k=1}^i \langle \overline{S(k \cdot f_0)} \rangle^2]} \quad (5)$$

where $\langle x \rangle$ means ensemble average of x , \bar{x} means temporal average of x , $N(f)$ is noise power density obtained as smoothed power spectrum of signal and noise $S(f)$, $\langle \overline{N_{low}} \rangle$ is averaged noise level at low frequencies. Local SNR evaluates relation of power of signal and noise after bandpass filtration. Then, optimal number of considered harmonics is $i_{opt} = \arg \max_i SNR_{local,times} (i)$, bandwidth is defined as $f_0 \dots i_{opt} \cdot f_0$. For the sake of simplicity, we can rewrite expression of local SNR through amplitudes of the constant harmonics and uniform noise and compare SNR(2) and SNR(3):

$$\begin{aligned} SNR(3) - SNR(2) &= \\ &= (E_1 + E_2 + E_3) / (N_{low}^2 \cdot 2f_0) - \\ &\quad - (E_1 + E_2) / (N_{low}^2 \cdot f_0) = \quad (6) \\ &= (E_3 - E_2 - E_1) / (N_{low}^2 \cdot 2f_0), \\ E_i &= (A_i - N_{low})^2. \end{aligned}$$

Expression (6) is positive if and only if $E_3 > E_2 + E_1$, then i might be minimized to

enhance SNR. It is appropriate to assign wide frequency range if there is lack of a prior knowledge about probable shaft frequency range.

Results

Performance of the method was tested on synthesized polyharmonic signals whose fundamental frequency was varied.

Amplitudes of components were $\langle S(k \cdot f_0) \rangle = A_k = \{1, 0.8, 0.7\}, k = 1 \dots 3$, global SNR (relation of power of signal and uniformly distributed in $0 \dots F_N$ noise, $F_N = 1$ kHz is Nyquist frequency) varied in wide range. Spectrogram of synthesized signal with linear and logarithmic scaled frequencies has been shown at Fig. 2a), 2b) respectively. Examples of temporal slices of spectrogram at three time moments $t_{1 \dots 3} = \{0, 1, 5\}$ sec are presented at Figure 2c. It is equivalent of spectrum of temporal frame of signal or values of instantaneous spectrum at fixed time moments. It is obvious that spectral peaks are almost equidistant and are shifted along y-axis. ACF of $S(t_1, f)$ and its CCF with $S(t_2, f)$ and $S(t_3, f)$ have been presented at Figure 2d. Maximum of correlation function indicates shift of the components measured in samples of frequency. Estimated logarithmic track $\hat{s}_{log}(t)$ and track expressed in per cents $\hat{s}_\%(t)$ are depicted at Fig. 2e, 2f. Variation of instantaneous frequency has been captured by the method.

The proposed method does not estimate instantaneous or central frequency. Then, performance of the method was evaluated as accuracy of frequency track estimation (Fig. 3) and detection rate of harmonics of resampled signal (Fig. 4).

Known frequency track of synthesized signal was translated to frequency shift in per cents: $s(t) = [f(t) - f(0)] / f(0) \cdot 100\%$. Accuracy of frequency shift estimation was evaluated as root mean squared error: $RMSE(x, \hat{x}) = [1 / n \sum (x - \hat{x}_i)^2]^{(1/2)}$, where \hat{x}_i is estimation of measured variable at the i -th experiment, x is the true value of measured variable.

Performance of the method relied on TFR based on STFT and filter bank was compared at Figure 3a. Length of the signal was 10 seconds, frequency of FF varied according to linear law with 10% per second growth speed (from 100 till 200 Hz) according to expression: $s_i = \sin(2\pi f(1 + k_i t))$, k_i is slope of the i -th signal. RMSE of FF shift

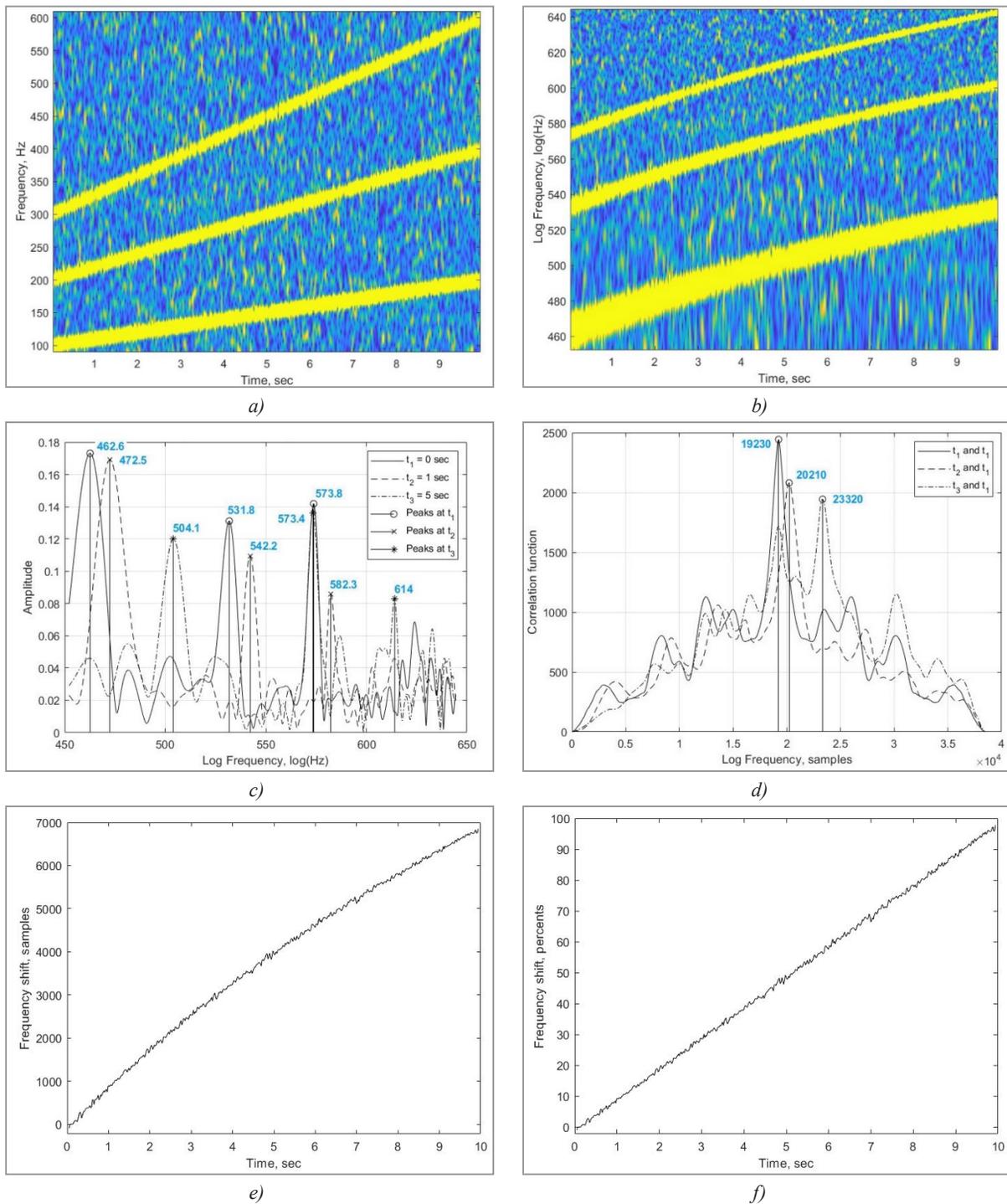


Fig. 2. Illustration of FF tracking using log-scaled TFR:
 a) Filter bank TFR; b) Log-scaled TFR; c) slices of log-scaled TFR;
 d) CCFs of spectral slices; e) log-scaled frequency track; f) estimation of FF track

of filter bank solution was significantly increased at lower SNRs due to side lobes of CCF of instantaneous spectra, but filter banks are recommended to be used to decompose short signals.

Performance of proposed method for estimation of shift of fundamental frequency of signals with different speed of frequency growth (10%,

20% 30% per sec) has been shown at The Fig. 3b. Length of the signals was 1 sec, initial frequency was 100 Hz. RMSE does not depends strong on speed of frequency variation, especially at high SNRs. It is notable that RMSE is significantly greater if deviation of FF is greater while its speed is the same at low SNRs and approaches half of

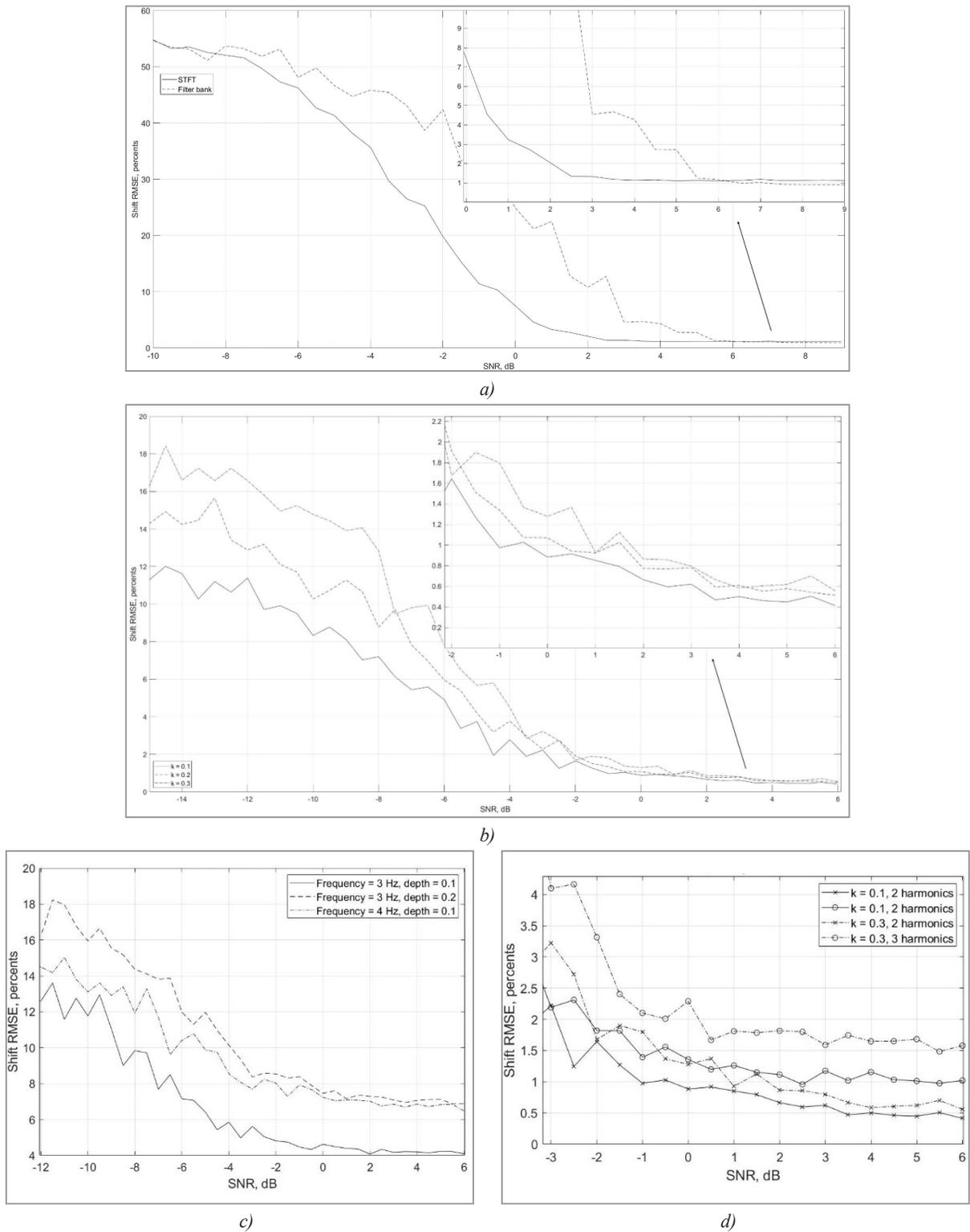


Fig. 3. Dependencies of RMSE of shift of FF on SNR:
 a) – comparison of two methods of TFR; b) – accuracy on conditions of different speed of frequency variation;
 c) – accuracy on sinusoidal frequency modulation conditions; d) – accuracy at different bandwidth

deviation, but at high SNRs it does not depend on frequency deviation.

According to (6), performance of the method decreased if bandwidth was extended. RMSE of

FF variation was compared for two cases: when analyzed band included two harmonics (bandwidth 90...270 Hz) and three harmonics (bandwidth 90...410 Hz) (Fig. 3d). Theoretically

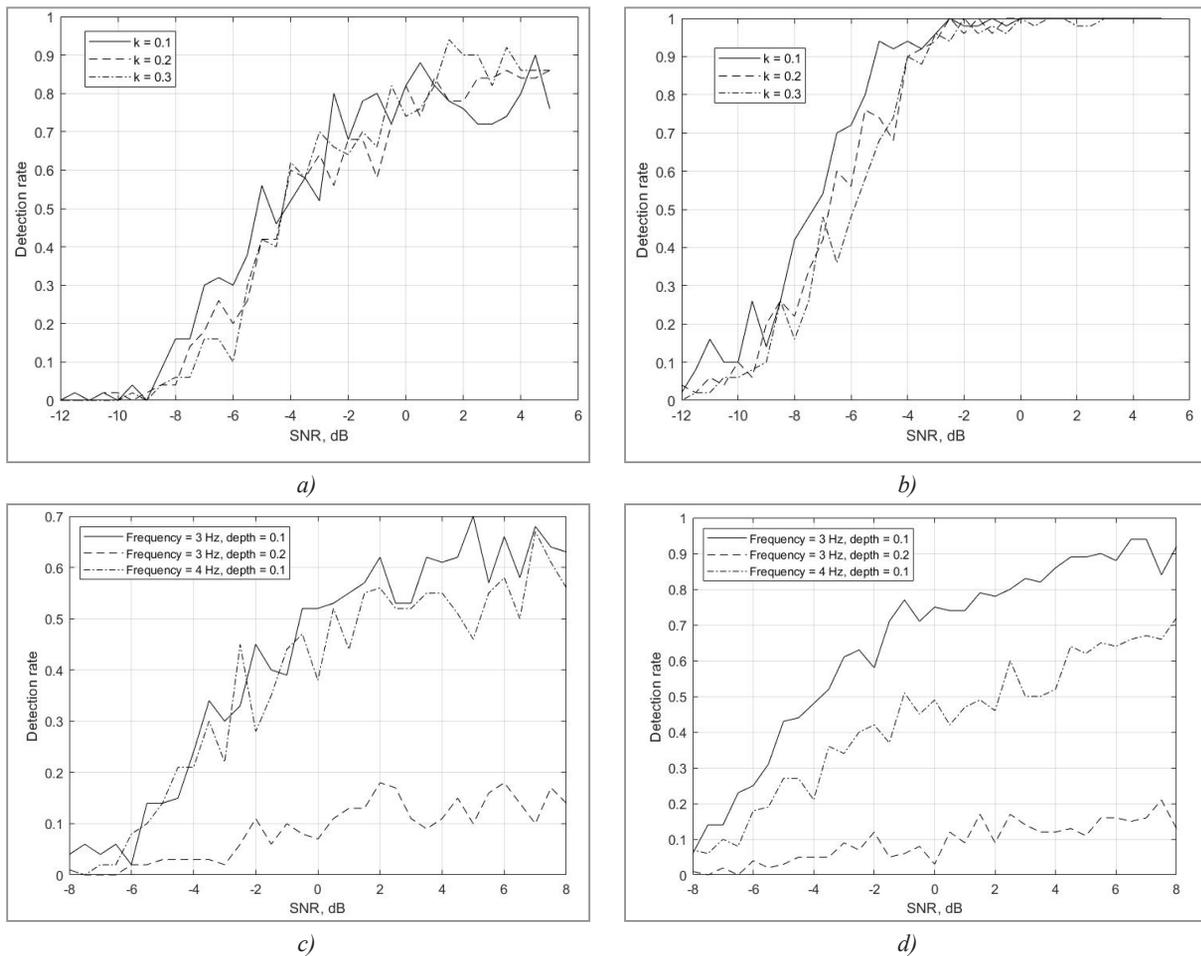


Fig. 4 – Dependencies of detection rate of harmonics of resampled signal on SNR:

- a) – detection of three harmonics of signals with linear modulation;
- b) – detection of the first harmonic of signals with linear modulation;
- c) – detection of three harmonics of signals with sinusoidal modulation;
- d) – detection of the first harmonic of signals with sinusoidal modulation

predicted increasing of error due to extension of bandwidth has been confirmed. Increasing of RMSE of shift has been shown for two values of frequency deviation speed ($k = \{1, 3\}$) at various SNRs.

Proposed method was also tested for signals with sinusoidal frequency modulation law (modulation frequency was 3 and 4 Hz) in the similar terms of accuracy. Dependence of RMSE of frequency shift was presented at Figure 3c at different frequency and depth of frequency modulation. Increasing any of frequency and depth leads to significant increasing of error at various SNRs.

Detection rate of three harmonics (Fig. 4a, 4c) and detection rate of the first harmonic (Fig. 4b, 4d) were calculated. Estimated shift of frequency was used to resample the signal to compensate frequency variation using interpolation

procedure (function *interp1* of MatLab package, 'pchip' method) [15]. Sample points were computed as phase of harmonic signal whose frequency was variated according to estimated track. Query points were calculated as phase of signal with the similar initial frequency that was constant. Instantaneous frequencies of components of resampled signal were constant and were equal to their initial values. Detection of harmonics was carried out using spectral interference method [19]. This method takes into account accuracy of frequencies of multiple components, splitting of the components and presence of various spectral peaks in the same analysis frame and has been used for evaluation of performance of the frequency estimation methods [15]. The highest spectral peak has been searched in spectral window of 10% width of each component. Each spectral component

is accepted to be detected if peaks of amplitude amounted 66% of maximum of analysis frame were not detected in the same window and local SNR ≥ 3 dB. This condition restricts splitting (amplitude and number of prominent side components) and harmonic and wideband noise influence. Three harmonics shall be treated as detected if all of them were detected separately, and accuracy of central frequencies of multiple components better than 1%. Accuracy was checked out using spectral interference method. Even small FF sweeping leads to leakage or splitting of the components, especially at high frequencies. Three harmonics of shaft rotation frequency are desirable for diagnosing using frequency domain methods [2], and it requires higher accuracy of shift estimation. Detection of spectral peak of FF indicated that deviation of estimated track from real one is not significant, and then FF of resampled signal is almost stationary. Detection of multiple harmonics requires higher accuracy. In some cases, three harmonics are not detected by spectral interference method due to leakage and offset of peaks.

In practice of processing of vibrational signals two-three harmonics of shaft rotation and gear mesh frequencies are usually present. Tracking of components of vibration envelope is also appropriate, especially if energy of useful components is low. Many harmonic components related with shaft rotation frequency are present in envelope of vibration of bearings and gearings [2] till $30 \cdot f_0$

(the third harmonic of ball pass outer ring frequency of 6213 bearing) and higher.

Conclusions

The method of instantaneous frequency tracking for processing of polyharmonic signals has been proposed. Its effectiveness was tested on synthesized signals. High performance of the method has been shown for various values of parameters of tested signal and SNR. Error of shift estimation grows when SNR decreased lower than -4 dB under conditions of any frequency modulation law for signals of 1 sec length. Rate of single harmonic detection decreased at the same SNR values. Detection of three harmonics using spectral interference method requires higher SNR and starts to decrease approximately at 1 dB. Unlike segmented Prony method, the proposed one cannot estimate absolute FF and compare errors of frequency estimation. RMSE of frequency estimation of Prony method remained less 2% of central frequency under the similar conditions and SNR > -5 dB. Error grows faster when SNR decreased under estimated threshold. Narrow band of analysis is recommended rather than wide band. It may be appropriate to use weighted least squares approximation to eliminate outliers and decrease error assuming some model of continuous frequency variation (e.g. [20]) and consider information carried by all components as well as envelope of vibration.

REFERENCES

1. **Barysenka, S. Y.** Single-channel speech enhancement using inter-component phase relations / S. Y. Barysenka, V. I. Vorobiov, P. Mowlae // *Speech Commun.* – 2018. – Vol. 99. – P. 144–160.
2. **Barkov, A. V.** Monitoring and diagnostics of rotary equipment relying on its vibration / A. V. Barkov, N. A. Barkova, A. Yu. Azovtsev. – Saint-Petersburg: publishing center of SMTU, 2000. – 159 p.
3. **Kosmach, N. V.** Approach of vibrational diagnosing of rolling bearing / H. B. Космач, Ю. П. Асламов. – 2020.
4. Influence of changes in shaft rotational speed of rotary equipment on frequency-domain processing / Yu. P. Aslamov [et al.] // *Doklady BGUIR.* – 2018. – Vol. 113, № 13. – P. 13–18.
5. **Zhang, X.** A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox / X. Zhang, G. Wen, T. Wu // *J. Vibroengineering.* – 2012. – Vol. 14, № 4. – P. 1766–1774.
6. **Aherwar, A.** Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: A review / A. Aherwar, S. Khalid // *Int. J. Adv. Eng. Technol.* – 2012. – Vol. 3. – P. 4–12.
7. **Bechhoefer, E.** A Review of Time Synchronous Average Algorithms / E. Bechhoefer, M. Kingsley. – 2009. – P. 10.
8. **Li, H.** Order Bi-spectrum For Bearing Fault Monitoring and Diagnosis Under Run-up Condition / H. Li // *J. Comput.* – 2011. – Vol. 6, № 9.
9. **Birchmeier, J. R.** Order tracking signal sampling process / J. R. Birchmeier. – 2002.
10. Rotating speed tracking and sampling method of variable speed mechanical fault diagnosis / Tang Deyao [et al.] – 2013.
11. Synchronous computed order tracking analytical approach of characteristic of rotating machines vibration signal / Wang Jiang [et al.]. – 2015.
12. **Jia Limin.** The maximum power tracing controlling method that speed-changing oar-changing wind power generating set is followed the tracks of based on optimum resisting moment / Jia Limin, Liu Zhan, Lei Tao. – 2015.

13. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov [et al.] // First World Congress on Condition Monitoring. – London, the British Institute of Non-Destructive Testing, 2017. – P. 11.
14. **Kechik, D.A.** Estimation of the instantaneous frequency of the spectral components of a nonstationary vibroacoustic signal by the segmented Prony method / D.A. Kechik // III All-russian acoustic conference / Politeh-press. – Saint-Petersburg, 2020. – P. 7.
15. **Kechik, D.** Segmented Autoregression Pitch Estimation Method / D. Kechik, I. Davydov // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2020. – P. 1–6.
16. Sparse Wavelet Decomposition with Redundant Dictionary for Vibration Waveform Analysis / Y.P. Aslamov [et al.] // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing. – Minsk, BSUIR, 2019. – P. 6.
17. **Lin, S.** Logarithmic Frequency Scaling and Consistent Frequency Coverage for the Selection of Auditory Filterbank Center Frequencies / S. Lin // ArXiv180100075 Cs Eess. – 2017.
18. **Bendat, J.S.** Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis / J.S. Bendat, A. G. Piersol. – Wiley, 1980. – 328 p.
19. Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // First World Congress on Condition Monitoring. – London, the British Institute of Non-Destructive Testing, 2017. – P. 11.
20. Time-Varying Autoregressions for Speaker Verification in Reverberant Conditions / V. Vestman [et al.] // Interspeech 2017: Interspeech 2017 / ISCA. – 2017. – P. 1512–1516.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Barysenka, S.Y.** Single-channel speech enhancement using inter-component phase relations / S. Y. Barysenka, V.I. Vorobiov, P. Mowlae // Speech Commun. – 2018. – Vol. 99. – P. 144–160.
2. **Барков, А.В.** Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
3. **Космач, Н.В.** Способ вибрационной диагностики подшипников качения / Н.В. Космач, Ю.П. Асламов. – 2020.
4. Влияние изменения скорости вращения вала роторного оборудования на обработку в частотной области / Ю.П. Асламов [et al.] // Доклады БГУИР. – 2018. – Vol. 113, № 13. – P. 13–18.
5. **Zhang, X.** A new time synchronous average method for variable speed operating condition gearbox / X. Zhang, G. Wen, T. Wu // J. Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, № 4. – P. 1766–1774.
6. **Aherwar, A.** Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: A review / A. Aherwar, S. Khalid // Int. J. Adv. Eng. Technol. – 2012. – Vol. 3. – P. 4–12.
7. **Bechhoefer, E.** A Review of Time Synchronous Average Algorithms / E. Bechhoefer, M. Kingsley. – 2009. – P. 10.
8. **Li, H.** Order Bi-spectrum For Bearing Fault Monitoring and Diagnosis Under Run-up Condition / H. Li // J. Comput. – 2011. – Vol. 6, № 9.
9. **Birchmeier, J.R.** Order tracking signal sampling process / J.R. Birchmeier. – 2002.
10. Rotating speed tracking and sampling method of variable speed mechanical fault diagnosis / Tang Deyao [et al.] – 2013.
11. Synchronous computed order tracking analytical approach of characteristic of rotating machines vibration signal / Wang Jiang [et al.] – 2015.
12. **Jia Limin.** The maximum power tracing controlling method that speed-changing oar-changing wind power generating set is followed the tracks of based on optimum resisting moment / Jia Limin, Liu Zhan, Lei Tao. – 2015.
13. Sparse wavelet decomposition of signals for solving vibration diagnostics problems / Y. Aslamov [et al.] // First World Congress on Condition Monitoring. – London, the British Institute of Non-Destructive Testing, 2017. – P. 11.
14. **Кечик, Д.А.** Оценка мгновенной частоты спектральных составляющих нестационарного виброакустического сигнала оконным методом прони / Д.А. Кечик // III Всероссийская акустическая конференция / Политех-пресс. – СПб, 2020. – С. 7.
15. **Kechik, D.** Segmented Autoregression Pitch Estimation Method / D. Kechik, I. Davydov // 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). – 2020. – P. 1–6.
16. Sparse Wavelet Decomposition with Redundant Dictionary for Vibration Waveform Analysis / Y.P. Aslamov [et al.] // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing. – Minsk, BSUIR, 2019. – P. 6.
17. **Lin, S.** Logarithmic Frequency Scaling and Consistent Frequency Coverage for the Selection of Auditory Filterbank Center Frequencies / S. Lin // ArXiv180100075 Cs Eess. – 2017.
18. **Bendat, J.S.** Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis / J.S. Bendat, A. G. Piersol. – Wiley, 1980. – 328 p.
19. Algorithms for refinement of the shaft rotational speed for solving the problems of vibration diagnostics of rotary equipment / Y. Aslamov [et al.] // First World Congress on Condition Monitoring. – London, the British Institute of Non-Destructive Testing, 2017. – P. 11.
20. Time-Varying Autoregressions for Speaker Verification in Reverberant Conditions / V. Vestman [et al.] // Interspeech 2017: Interspeech 2017 / ISCA. – 2017. – P. 1512–1516.

Поступила
16.12.2020

После доработки
10.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

КЕЧИК Д. А., АСЛАМОВ Ю. П., ДАВЫДОВ И. Г.

МЕТОД ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ, ОСНОВАННЫЙ НА ОЦЕНКЕ СМЕЩЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПИКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

В различных областях обработки сигналов возникает проблема оценки изменяющейся частоты компонентов полигармонических сигналов. Для решения данной задачи традиционно используется трёхмерное частотно-временное представление сигнала. Но так же необходим простой и надёжный метод слежения за мгновенной частотой сигнала. В данной работе предложен метод слежения за частотой, основанный на оценке смещения пиков спектрограммы. Предполагается, что смещение спектральных пиков компонент сигнала пропорционально изменению базовой частоты. Логарифмическое масштабирование частотно-временного распределения используется, чтобы расположить спектральные пики на равных расстояниях по частотной оси. Временная зависимость смещения частотных пиков вычисляется при помощи корреляции спектра сигнала в первом и текущем временных окнах. Затем полученный частотный трек переводится обратно в линейный масштаб. Предложенный метод не оценивает значения мгновенной частоты или центральную частоту компонент сигнала, а оценивает изменение частоты. Преимущество методов – возможность оценивания частотного трека даже при известных грубо или неизвестных вообще диапазоне изменения частоты или её центрального значения. Наличие множества компонент в окне анализа не препятствует оценке изменения частоты. Рекомендуется сужение частотного диапазона для оценки изменения частоты, однако анализ частотно-временного распределения, содержащего несколько составляющих, так же возможно. Так же в работе оценивалась эффективность анализа синтезированных сигналов предложенным методом при различных отношениях сигнал-шум и прочих условиях. Методом спектральной интерференции проверялась применимость предложенного метода оценки изменения частоты для вибрационной диагностики роторного оборудования.

Ключевые слова: *мгновенная частота, вейвлеты, спектрограмма, корреляционная функция, слежение за частотой, оценка частоты, частота основного тона*

Кечик Даниил Александрович. Магистр технических наук (2018), аспирант кафедры Информационных радиотехнологий БГУИР.

Kechik Daniil Aleksandrovich. Master of science (2018), PhD student Department of Information Radio Technologies of BSUIR.

Асламов Юрий Павлович. Закончил аспирантуру на кафедре Информационных радиотехнологий БГУИР, кандидат технических наук.

Aslamov Yuri Pavlovich. Attended a post-graduate course at Department of Information Radio Technologies of BSUIR, Ph D.

Давыдов Игорь Геннадьевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных радиотехнологий, БГУИР.

Davydov Igor Gennadyevich. PhD, associate professor of Department of Information Radio Technologies of BSUIR.

Ц. МА, В. Ю. ЦВЕТКОВ, В. К. КОНОПЕЛЬКО

ДВУХШАГОВАЯ СКЕЛЕТИЗАЦИЯ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ЗАНГА-СУЕНА И ПОРОЖДАЮЩЕЙ МАСКИ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Целью работы является предельное утоньшение и повышение устойчивости к контурному шуму скелетов бинарных объектов произвольной формы при сохранении высокой скорости скелетизации. Скелет представляет собой множество тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых передает информацию о размере, форме и ориентации в пространстве соответствующей однородной области изображения. Для обеспечения устойчивости к контурному шуму каждая итерация алгоритмов скелетизации разделяется на несколько шагов. Благодаря относительно качественным скелетам и средней производительности широкую известность получил двухшаговый алгоритм Занга-Суена. Его недостатками являются размытие диагональных линий толщиной 2 пикселя и удаление областей размером 2x2 пикселей. Для их устранения в статье предложена математическая модель, дополняющая модель Занга-Суена порождающей маской и двумя логическими условиями оценки ее элементов.

Ключевые слова: скелетизация изображений, алгоритм Занга-Суена, двухшаговая скелетизация, параллельная скелетизация.

Введение

В задачах параметризации объектов изображений часто используется скелетизация (утоньшение) – преобразование однородной области, соответствующей объекту, во множество тонких линий, взаимное расположение, размеры и форма которых передает информацию о размере, форме и ориентации в пространстве соответствующей области. Алгоритмы скелетизации делятся на две основные группы [1]: неитерационные и итерационные. Неитерационные алгоритмы реализуют скелетизацию за один проход, что обеспечивает высокое быстродействие, но приводит к низкому качеству скелетов. Итерационные алгоритмы постепенно удаляют слои пикселей на границе области до получения тонких линий, что улучшает качество скелетов, но приводит к высокой вычислительной сложности. Итерационные алгоритмы разделяются на последовательные и параллельные. В последовательных алгоритмах результат скелетизации на каждой итерации зависит от порядка выборки пикселей, что приводит к неинвариантности скелета к повороту изображения. В параллельных алгоритмах порядок обработки пикселей на каждой итерации не влияет на результат,

что повышает стабильность скелета к повороту изображения. Основными проблемами параллельных алгоритмов является сохранение связности фрагментов скелета и чувствительность к контурному шуму. Для их решения в некоторых параллельных алгоритмах каждая итерация разбивается на несколько шагов. Широкую известность получил параллельный алгоритм Занга-Суена (ZS) с двумя шагами на каждой итерации [2], основанный на 6-ти логических условиях и обеспечивающий средние характеристики по скорости и качеству по сравнению с другими параллельными алгоритмами [3]. Как установлено в [4], основными недостатками алгоритма ZS являются размытие диагональных линий толщиной 2 пикселя и удаление областей размером 2x2 пикселей. Для устранения данных недостатков и развития алгоритма ZS предложены следующие его модификации: изменение порогового значения в первом логическом условии [4]; изменение логических условий на втором шаге [5]; расширение набора логических условий на первом и втором шагах [6–10] в сочетании с масками [10]; обработка скелетов после применения алгоритма ZS с использованием дополнительных логических условий [11–14],

расширенных прямоугольной [11] и квадратных [13] масок, измененного порогового значения в первом логическом условии [14]; предварительная обработка скелета перед алгоритмом ZS с использованием дополнительных логических условий [15]. Повышение качества скелетов в этих модификациях достигается за счет роста вычислительной сложности. Некоторые из рассмотренных алгоритмов ориентированы на обработку специфических изображений: сканированных символов [2, 4, 8, 11–15], топологических схем [10], отпечатков пальцев [5]. Целью работы является предельное утоньшение и повышение устойчивости к контурному шуму скелетов бинарных объектов произвольной формы при сохранении высокой скорости скелетизации.

Постановка задачи

Для бинарного изображения $I = \left\| i(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ размером $Y \times X$, пиксели которого имеют значения 1 или 0 в зависимости от принадлежности площадному объекту или фону соответственно, алгоритмы скелетизации формируют матрицу $S = \left\| s(y, x) \right\|_{(y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1})}$ скелетизации, значения элементов которой 1 или 0 указывают на фрагменты скелета или фона соответственно.

В алгоритме ZS каждая итерация состоит из двух шагов и приводит к обнулению части единичных элементов $s_{ZS}(y, x)$ матрицы S_{ZS} скелетизации (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу S_{ZS} скелетизации), смежные элементы в окрестности которых (рис. 1, а, $p(1) = s_{ZS}(y, x)$) удовлетворяют определенным условиям.

На первом шаге обнуляются элементы $s_{ZS}(y, x)$, смежные элементы которых удовлетворяют условиям

$$2 \leq \sum_{k=2}^9 p(k) \leq 6, \tag{1}$$

$$A(p(1)) = 1, \tag{2}$$

$$p(2) p(4) p(6) = 0, \tag{3}$$

$$p(4) p(6) p(8) = 0, \tag{4}$$

где $A(p(1))$ – число комбинаций 01, встречающихся среди элементов $p(2) - p(9)$.

На втором шаге обнуляются элементы $s_{ZS}(y, x)$, смежные элементы которых удовлетворяют условиям (1), (2) и условиям

$$p(2) p(4) p(8) = 0, \tag{5}$$

$$p(2) p(6) p(8) = 0. \tag{6}$$

Итерации продолжаются до тех пор, пока элементы $s_{ZS}(y, x)$ обнуляются.

Из выражений (1) – (6) следует, что элементы $p(2), p(4), p(6), p(8)$ выбираются для обработки 7 раз, остальные элементы – 4 раза. Таким образом, на каждый единичный элемент $s_{ZS}(y, x)$ матрицы S_{ZS} приходится 44 операции обработки смежных элементов.

В качестве примера на рис. 1 приведены бинарное изображение I размером 15x15 пикселей (рис. 1, б), содержащее несколько объектов, бинарное изображение матрицы скелетизации S , соответствующее этому изображению и сформированное с помощью алгоритма ZS [2] (рис. 1, в). Из рис. 1 следует, что алгоритм ZS не обеспечивает минимальную толщину линий скелета (многие узловые элементы имеют более двух соседей) и теряет некоторые диагональные линии и области 2x2.

Предлагаемые математическая модель и алгоритм скелетизации

Для построения предельно тонких, устойчивых к контурному шуму связанных скелетов (неузловые элементы скелета имеют не более

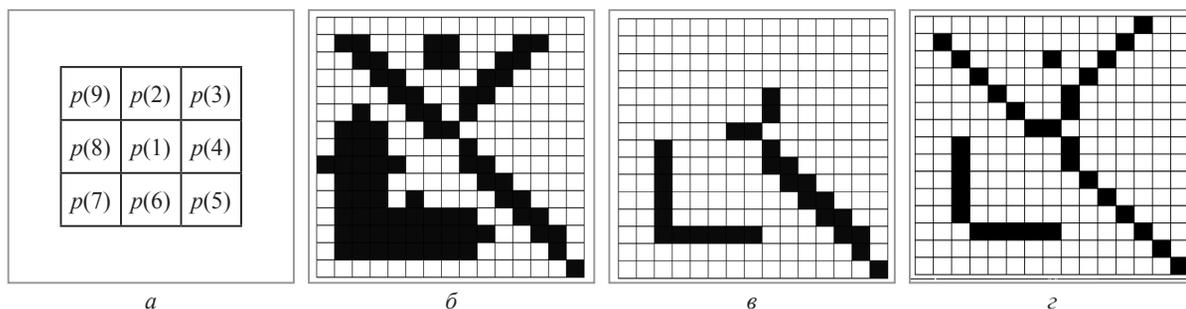


Рисунок 1. Бинарное изображение и результаты его скелетизации:

а – бинарная маска алгоритма ZS; б – бинарное изображение; в – скелеты ZS; г – скелеты ZSM (г - угол)

двух соседей и каждый фрагмент скелета, соответствующий некоторому бинарному объекту, имеет в своем составе элемент, граничащий с элементом другого фрагмента, соответствующего тому же бинарному объекту) бинарных изображений с низкой вычислительной сложностью предлагается математическая модель ZSM (Zhang-Suen Super Mask) двухшаговой

скелетизации на основе модифицированной модели ZS, дополненной базовой маской 5x5 элементов (рис. 2, а), которая является порождающей для одной производной маски 4x4 элемента (рис. 2, б) и 4-х производных масок 4x3 элемента (рис. 2, в), и двумя логическими условиями оценки элементов порождающей маски.

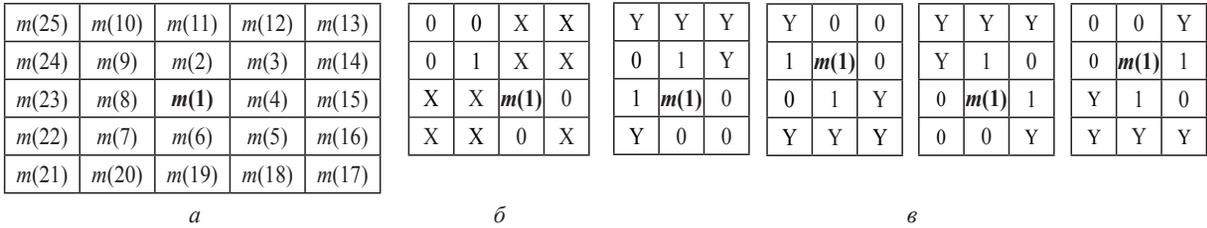


Рис. 2. Бинарные маски ZSM: а – порождающая маска 5x5; б – производная маска 4x4; в – производные маски 4x3

На первом шаге в модели ZSM единичный элемент $s_{ZSM}(y, x)$ матрицы S_{ZSM} скелетизации обнуляется (перед первой итерацией значения пикселей бинарного изображения I переносятся в матрицу S_{ZSM} скелетизации), если значения элементов выборки $P = \parallel p(k) \parallel_{(k=2, \overline{11})}$, формируемой из элементов окрестности

$s_{ZSM}(y, x)$, показанной на рис. 1, а ($p(1) = s_{ZSM}(y, x)$), удовлетворяет условию (1) модели ZS, а также для элементов выборки $M = \parallel m(k) \parallel_{(k=2, \overline{25})}$, формируемых из элементов окрестности $s_{ZSM}(y, x)$ покрываемых порождающей маской, показанной на рис. 2, а ($m(1) = s_{ZSM}(y, x)$), выполняется условие:

$$\left((A(p(1)) = 1) \wedge \neg (m(4) = 0 \wedge m(6) = 0 \wedge m(9) = 1 \wedge m(10) = 0 \wedge m(24) = 0 \wedge m(25) = 0) \right) \vee \left((A(p(1)) = 2) \wedge \left(\begin{array}{l} (m(3) + m(7) + m(10) + m(11) + m(12) > 0 \wedge \\ \wedge m(2) = 1 \wedge m(4) = 0 \wedge m(5) = 0 \wedge m(6) = 0 \wedge m(8) = 1 \wedge m(9) = 0) \vee \\ (m(5) + m(9) + m(18) + m(19) + m(20) > 0 \wedge \\ \wedge m(2) = 0 \wedge m(3) = 0 \wedge m(4) = 0 \wedge m(6) = 1 \wedge m(7) = 0 \wedge m(8) = 1) \end{array} \right) \right) \quad (7)$$

где $A(p(1)) = \sum_{k=2}^9 |p(k) - p(\text{mod}_8(k-2+1)+2)| -$ эквивалентно $A(p(1))$ в ZS.

ментов окрестности $s_{ZSM}(y, x)$, показанной на рис. 1, а, удовлетворяет условию (1) модели ZS, а также для элементов выборки $M = \parallel m(k) \parallel_{(k=2, \overline{25})}$, формируемых из элементов окрестности $s_{ZSM}(y, x)$ покрываемых порождающей маской, показанной на рис. 2, а, выполняется условие:

$$\left((A(p(1)) = 1) \wedge \neg (m(4) = 0 \wedge m(6) = 0 \wedge m(9) = 1 \wedge m(10) = 0 \wedge m(24) = 0 \wedge m(25) = 0) \right) \vee \left((A(p(1)) = 2) \wedge \left(\begin{array}{l} (m(5) + m(9) + m(10) + m(11) + m(12) > 0 \wedge \\ \wedge m(2) = 1 \wedge m(3) = 0 \wedge m(4) = 1 \wedge m(6) = 0 \wedge m(7) = 0 \wedge m(8) = 0) \vee \\ (m(3) + m(7) + m(18) + m(19) + m(20) > 0 \wedge \\ \wedge m(2) = 0 \wedge m(4) = 1 \wedge m(5) = 0 \wedge m(6) = 1 \wedge m(8) = 0 \wedge m(9) = 0) \end{array} \right) \right) \quad (8)$$

Из выражений (1), (3) – (8) следует, что элементы $p(2) - p(9)$ выбираются такое же

число раз, как в алгоритме ZS. Иногда, при выполнении условия $A(p(1)) = 1$ дополнительно

выбираются элементы $m(4)$, $m(6)$, $m(9)$, $m(10)$, $m(24)$, $m(25)$, что увеличивает число операций на 6 раз. А при невыполнении условия $A(p(1))=1$, проверяется условие $A(p(1))=2$ и дополнительно выбираются еще ряд элементов из набора $m(2) - m(25)$. С учетом того, что контурных элементов, обрабатываемых алгоритмом ZSM, значительно меньше по сравнению с общим числом элементов матрицы I, условия $A(p(1))=1$ и $A(p(1))=2$ выполняются относительно редко. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма ZSM несколько выше вычислительной сложности алгоритма ZS.

Алгоритм ZSM состоит из следующих шагов.

Вход: Бинарное изображение I.

Инициализация матрицы S_{ZSM} скелетизации: $S_{ZSM} \leftarrow I$.

Цикл 1 (итеративная обработка матрицы S_{ZSM}):

Инициализация счетчика удаленных элементов: $N_{DE} \leftarrow 0$

Цикл 2 по (y, x) (удаление избыточных элементов матрицы S_{ZSM}):

Если для $s_{ZSM}(y, x) = 1$ выполняются условия (1), (7), то $s_{ZSM}(y, x) \leftarrow 0$; $N_{DE} \leftarrow N_{DE} + 1$.

Конец цикла 2.

Цикл 3 по (y, x) (удаление избыточных элементов матрицы S_{ZSM}):

Если для $s_{ZSM}(y, x) = 1$ выполняются условия (1), (8), то $s_{ZSM}(y, x) \leftarrow 0$; $N_{DE} \leftarrow N_{DE} + 1$.

Конец цикла 3.

Если $N_{DE} = 0$, то выход из цикла 1.

Конец цикла 1.

Выход: Матрица S_{ZSM} скелетизации.

Таким образом, в результате выполнения алгоритма ZSM формируется матрица S_{ZSM} скелетизации, единичные элементы которой указывают на линии скелетов, соответствующих бинарным объектам на исходном изображении I.

Оценка эффективности алгоритма скелетизации

Произведено сравнение предложенного алгоритма ZSM с алгоритмом двухшаговой ZS скелетизации [2], а также алгоритмом одношаговой скелетизации ОПТА [16] и его модификацией ОРСА [17]. Алгоритм ОРСА

отличается от алгоритмов ZS и ОПТА исключением избыточных масок и упрощением условий удаления пикселей, что делает его более быстрым. Алгоритмы реализованы на языке программирования C++ и протестированы на компьютере с ОС Windows 8 64-бит, CPU i7 2,6 GHz, RAM 8 GB. При этом использованы, предложенные в [6, 18] оценки: толщина скелета ST ($ST \in [0,1]$); чем значение ST ближе к единице, тем скелет тоньше) [6], скорость скелетизации TS (число удаляемых элементов в секунду; чем значение TS больше, тем скорость утоньшения выше) [18], средняя ось МА (определяет возможность восстановления исходного изображения по скелету; чем значение МА ближе к единице, тем восстанавливаемость выше) [6], определяемые с помощью выражений (9) – (11).

$$ST = 1 - \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} \bigcup_{k=1}^4 s(y, x) Q(k)}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} s(y, x)}, \quad (9)$$

где $Q(k)$ – бинарная маска (рис. 3), позволяющая выявить избыточные элементы скелета.

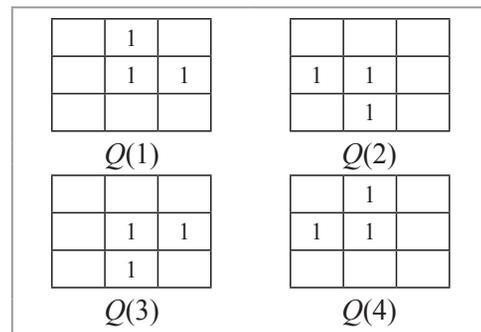


Рис. 3. Бинарные маски

$$TS = \left(\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y, x) - \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} s(y, x) \right) / ET, \quad (10)$$

где ET – время скелетизации в секундах.

$$MA = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i'(y, x)}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y, x)}, \quad (11)$$

где $i'(y, x)$ – пиксели восстановленного по скелету S изображения

$$I' = \left\| i'(y, x) \right\|_{y=0, \overline{Y-1}, x=0, \overline{X-1}}$$

Результаты скелетизации 6-ти тестовых изображений $I(1) - I(6)$ и значения их оценок ST, TS, МА для алгоритмов ZS и ZSM приведены на рис. 4 и в табл. 1.

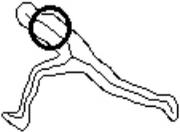
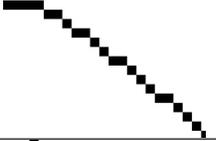
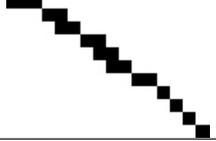
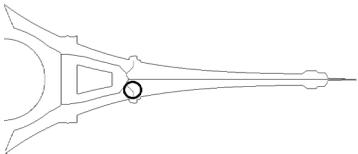
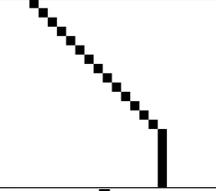
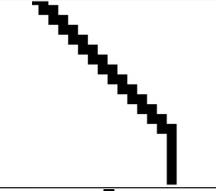
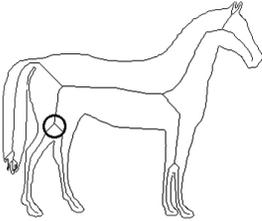
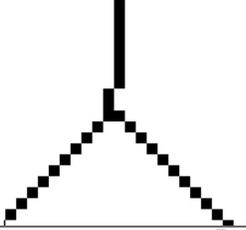
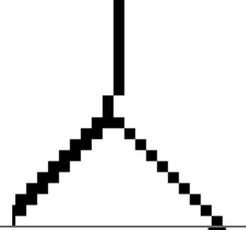
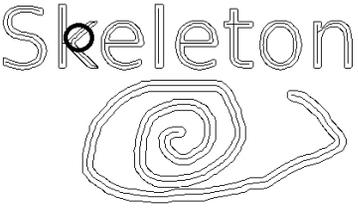
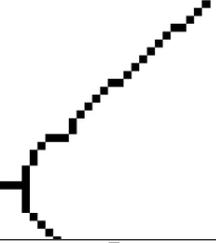
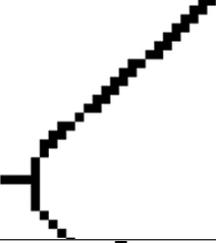
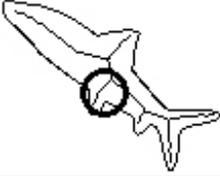
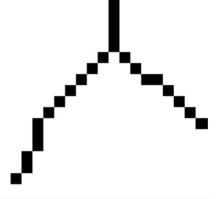
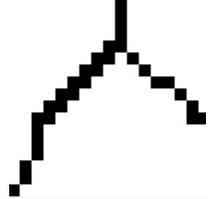
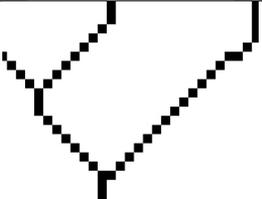
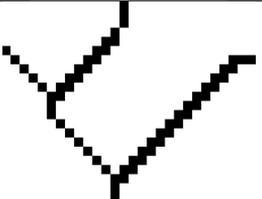
Тестовое изображение с выделенным фрагментом для алгоритма ZSM		Увеличенные изображения фрагментов, ограниченных окружностями	
		для алгоритма ZSM	для алгоритма ZS
I(1)			
I(2)			
I(3)			
I(4)			
I(5)			
I(6)			

Рис. 4. Результаты скелетизации тестовых изображений с помощью алгоритмов ZS и ZSM

Из табл. 1 следует, что по оценке ST алгоритм ZSM превосходит алгоритм ZS, уступая ему в большинстве случаев в производительности (оценка TS), что подтверждает теоретическую оценку. Оценка MA не дает однозначного результата. Поэтому в табл. 1 приведены также значения избыточности связей между

пикселями скелета SC ($SC \geq 0$; чем значение SC ближе к нулю, тем меньше избыточных связей и пикселей в скелете; неконцевые и узловые пиксели предельно тонкого скелета должны иметь связи только с двумя смежными пикселями), для определения которой предлагается использовать выражение

$$SC = \left(\sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} \left(s(y,x) \left(\sum_{j=-1}^1 \sum_{i=-1}^1 s(y+j, x+i) - 1 \right) \right) - \left(2 \sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} s(y,x) - N_{EP} \right) \right) / \sum_{y=1}^{Y-2} \sum_{x=1}^{X-2} s(y,x), \quad (12)$$

где N_{EP} – число концевых элементов скелета.

Таблица 1. Оценки результатов скелетизации тестовых изображений $I(1) - I(6)$

Изображение	Алгоритм	ST	TS	MA	SC	SE			
						CN=5%	CN=10%	CN=20%	CN=40%
I(1)	ZS	0,78	854	0,92	0,19	0,79	0,83	1,21	0,99
	ZSM	0,99	802	0,91	0,02	0,86	0,83	1,17	0,99
	OPTA	0,86	645	0,85	0,12	1,21	1,33	1,87	1,32
	OPCA	0,99	1318	0,93	0,02	3,52	4,54	4,04	3,15
I(2)	ZS	0,88	462	0,96	0,12	0,85	1,67	2,15	2,32
	ZSM	1,00	431	0,96	0,01	0,81	1,57	2,16	2,09
	OPTA	0,90	195	0,91	0,10	1,38	2,19	2,57	2,85
	OPCA	1,00	575	0,96	0,00	4,36	7,67	7,41	7,48
I(3)	ZS	0,84	516	0,95	0,15	0,46	1,16	1,77	1,79
	ZSM	0,99	482	0,95	0,02	0,57	1,13	1,83	1,70
	OPTA	0,98	204	0,89	0,03	0,90	1,98	1,87	2,42
	OPCA	1,00	705	0,95	0,01	6,46	7,91	9,93	9,73
I(4)	ZS	0,80	1352	0,95	0,17	0,88	1,11	1,12	1,21
	ZSM	0,99	1116	0,94	0,01	0,94	1,11	1,13	1,31
	OPTA	0,94	793	0,90	0,07	1,28	1,40	1,18	1,16
	OPCA	1,00	2549	0,95	0,00	4,87	5,38	5,55	5,56
I(5)	ZS	0,66	766	0,93	0,28	0,77	1,33	1,50	1,56
	ZSM	0,99	649	0,94	0,01	0,86	1,38	1,49	1,37
	OPTA	0,70	428	0,85	0,24	1,64	1,75	2,42	1,59
	OPCA	0,99	1092	0,94	0,02	3,96	4,71	4,80	5,55
I(6)	ZS	0,73	633	0,94	0,22	1,14	1,20	2,07	2,40
	ZSM	0,99	632	0,92	0,02	1,17	1,34	2,06	2,26
	OPTA	0,96	351	0,72	0,04	1,23	2,16	2,54	2,37
	OPCA	0,99	916	0,95	0,01	4,26	6,64	6,68	6,45

В табл. 2 приведены значения оценок (9)–(12), усредненные по 100 бинарным изображениям, содержащихся в работах [2, 4, 6] и тестовой базе Kimia's 99 [19]. Из табл. 2 следует, что алгоритм ZSM превосходит алгоритм ZS на 21 % по оценке ST и в 9,5 раза по оценке SC, уступая ему в производительности (оценка TS) только 2 %.

В табл. 1 и 2 приведены данные по алгоритмам одношаговой скелетизации OPTA [16]

и OPCA [17], из которых следует, что алгоритм ZSM по производительности (оценка TS) и качеству (оценки ST, MA, SC) превосходит OPTA, но уступает OPCA. Произведена оценка устойчивости рассматриваемых алгоритмов к контурному шуму. На рис. 5 приведены зашумленное изображение $I(1)$ и соответствующие ему скелеты, полученные с помощью алгоритмов ZS, ZSM, OPTA и OPCA, для уровня CN контурного шума 20 %.

Таблица 2. Средние значения оценок результатов скелетизации для 100 изображений

Алгоритм	ST	TS	MA	SC	SE			
					CN=5%	CN=10%	CN=20%	CN=40%
ZS	0,78	640	0,93	0,19	0,82	1,22	1,64	1,71
ZSM	0,99	627	0,93	0,02	0,93	1,23	1,61	1,62
OPTA	0,92	305	0,86	0,10	1,27	1,80	2,08	1,95
OPCA	1,00	860	0,95	0,01	4,57	6,14	6,40	6,32

Уровень CN контурного шума (в процентах) определяется на основе базового I (неза-

шумленного) и зашумленного \tilde{I} изображений с помощью выражения

$$CN = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y,x) \oplus \tilde{i}(y,x)) / \left(4 \sqrt{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} i(y,x)} \right) \cdot 100\%, \quad (13)$$

где \oplus – операция поэлементного суммирования по модулю два.

В табл. 1 и 2 приведены значения взвешенной ошибки SE формирования скелета, харак-

теризующей устойчивость к контурному шуму. Значения SE вычисляются на основе изображений I , \tilde{I} и соответствующих им матриц скелетизации S и \tilde{S} с помощью выражения

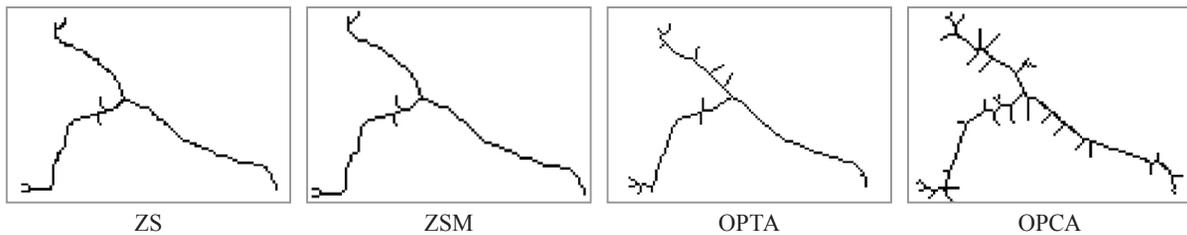


Рис. 5. Скелеты изображения $I(1)$, полученные с помощью ZS, ZSM и OPTA, при уровне контурного шума 20%

$$SE = \frac{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (s(y,x) \oplus \tilde{s}(y,x))}{\sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} (i(y,x) \oplus \tilde{i}(y,x))}. \quad (14)$$

Числитель выражения (14) показывает количество несовпадающих пикселей скелетов S и \tilde{S} , а знаменатель – количество несовпадающих пикселей изображений I и \tilde{I} . Из табл. 1 и 2 следует, что по сравнению с ZS алгоритм ZSM уступает в устойчивости к слабому контурному шуму ($CN=5\%$) в 1,13 раза и выигрывает в устойчивости к сильному контурному шуму ($CN=40\%$) в 1,06 раза. При этом алгоритм ZSM в среднем в 1,33 и 4,45 раза более устойчив к контурному шуму по сравнению с OPTA и OPCA соответственно.

Заключение

Предложена математическая модель двухшаговой скелетизации на основе модифицированной модели Занга-Суена, дополненной порождающей маской и двумя логическими условиями оценки ее элементов. Реализация предложенной модели обеспечивает по сравнению с моделью Занга-Суена утоньшение скелета на 21% и сокращение числа избыточных связей между пикселями скелета в 9,5 раза при приблизительно такой же производительности и снижении устойчивости к контурному шуму в 1,1 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Saha, P.K. A survey on skeletonization algorithms and their applications / P.K. Saha, G. Borgefors, G. Baja // Pattern Recognition Letters. – 2016. – Vol. 76. – P. 3–12.
2. Zhang, T.Y. A fast parallel algorithm for thinning digital patterns / T.Y. Zhang, C.Y. Suen // Comm. ACM. – 1984. – Vol. 27(3). – P. 236–239.
3. Harous, S. Handwritten Character-Based Parallel Thinning Algorithms: A Comparative Study / S. Harous, A. Elnagar // University of Sharjah Journal of Pure & Applied Sciences. – 2009. – Vol. 6(1). – P. 81–101.
4. Lu, H.E. A Comment on “A Fast Parallel Algorithm for Thinning Digital Patterns” / H.E. Lu, P.S.P. Wang // Communications of the ACM. – 1986. – Vol. 29(3). – P. 239–242.
5. Kocharyan, D. A Modified fingerprint image thinning algorithm / D. Kocharyan // American Journal of Software Engineering and Applications. – 2013. – Vol. 2(1). – P. 1–6.
6. Boudaoud, L.B. A new thinning algorithm for binary images / L.B. Boudaoud, A. Sider, A. Tari // 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology. – 2015. – P. 1–6.
7. Boudaoud L.B. A modified ZS thinning algorithm by a hybrid approach / L.B. Boudaoud, B. Solaiman, A. Tari // The Visual Computer. – 2017. – P. 689–706.
8. Guo, Z. Parallel thinning with two-subiteration algorithms / Z. Guo, R. W. Hall // Communications of the ACM. – 1989. – Vol. 32(3). – P. 359–373.
9. Guo, Z. Fast fully parallel thinning algorithms / Z. Guo, R. W. Hall // CVGIP: Image Understanding. – 1992. – Vol. 55(3). – P. 317–328.
10. Zhang, Y.Y. A parallel thinning algorithm with two-subiteration that generates one-pixel-wide skeletons / Y.Y. Zhang, P.P. Wang // International Conference on Pattern Recognition, Vienna, Austria. – 1996. – Vol. 4. – P. 457–461.
11. Abdulla, W.H. A preprocessing algorithm for handwritten character recognition / W.H. Abdulla, A.O.M. Saleh, A.H. Morad // Pattern Recognition Letters. – 1988. – Vol. 7(1). – P. 13–18.
12. Sossa, J.H. An improved parallel algorithm for thinning digital patterns / J.H. Sossa // Pattern Recognition Letters. – 1989. – Vol. 10. – P. 77–80.
13. Tarabek, P. A Robust Parallel Thinning Algorithm for Pattern Recognition / P. Tarabek // 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics. – 2012. – P. 75–79.
14. Kwon, J.-S. An enhanced thinning algorithm using parallel processing / J.-S. Kwon, J.-W. Gi, E.-K. Kang // IEEE. – 2001. – P. 752–755.
15. Dong, J. An improved parallel thinning algorithm / J. Dong, W. Lin, C. Huang // Proceedings of the 2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Jeju, South Korea. – 2016. – P. 162–167.
16. Chin, R.T. A one-pass thinning algorithm and its parallel implementation // R.T. Chin, H.K. Wan, D.L. Stover, R.D. Iverson // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1987. – Vol. 40. – P. 30–40.

17. **Ma, Ц.** Скелетизация изображений на основе комбинации одно- и двухподытерационных моделей // Ц. Ма, В. Ю. Цветков, В. К. Конопелько // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 25–35.
18. **Jang, B. K.** One-pass parallel: analysis, properties, and quantitative evaluation / B. K. Jang, R. T. Chin // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14. – P. 1129–1140.
19. **Sebastian, T. B.** Recognition of shapes by editing their shock graphs / T. B. Sebastian, P. N. Klein, B. B. Kimia // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2004. – Vol. 26(5). – P. 550–571.

Поступила
03.12.2020

После доработки
22.02.2021

Принята к печати
01.03.2021

MA J., TSVIATKOU V. Yu., KANAPELKA V. K.

TWO-STEP SKELETIZATION OF BINARY IMAGES BASED ON THE ZHANG-SUEN MODEL AND THE PRODUCING MASK

The aim of the work is to limit excessive thinning and increase the resistance to contour noise of skeletons resulted from arbitrary binary image shape while maintaining a high skeletonization rate. The skeleton is a set of thin lines, the relative position, the size and shape, which conveys information of size, shape and orientation in space of the corresponding homogeneous region of the image. To ensure resistance to contour noise, skeletonization algorithms are built on the basis of several steps. Zhang-Suen algorithm is widely known by high-quality skeletons and average performance, which disadvantages are the blurring of diagonal lines with a thickness of 2 pixels and the totally disappear patterns of 2x2 pixels. To overcome them, a mathematical model that compensates the Zhang-Suen algorithm has proposed in this paper, along with a producing mask and two logical conditions for evaluating its elements.

Keywords: image skeletonization, Zhang-Suen algorithm, two-step skeletonization, parallel skeletonization.



Ma Цзюнь – Аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
Ma Jun PG student of department of infocommunication technologies of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: majun1313@hotmail.com



Цветков В.Ю. – Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
V. Yu. Tsviatkou. Doctor of Engineering, associate professor, head of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: vtsvet@bsuir.by.



Конопелько В.К. – Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
V. Yu. Tsviatkou. Doctor of Engineering, professor, professor of department of infocommunications of Belerussian state university of informatics and radioelectronics.
E-mail: kafikt@bsuir.by.

Работа выполнена в рамках ГБЦ 16–2033 «Исследование методов обработки и передачи видеоданных в инфокоммуникациях» (№ госрегистрации 20163903).

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
В ОБРАЗОВАНИИ**

**INFORMATION
TECHNOLOGIES
IN EDUCATION**

A. V. PETUKHOV

IMPLEMENTATION OF INTEGRATED DESIGN SYSTEMS IN THE LEARNING PROCESS

Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

The modern stage of development of CAD-systems is characterized by a significant expansion of the scope of their use. An interesting direction for improving CAD systems is their integration with CAM systems. One of the main tasks solved by CAM systems is the development of control programs for CNC machines. Many software developers for automation of design and technological preparation of production have already equipped their systems with appropriate modules. These circumstances pose an urgent task for higher educational institutions to introduce the study of integrated CAD/CAM systems into the educational process of training design engineers. In this case, the emphasis should be placed on the practical mastery of the skills of developing control programs using a 3D-model of the manufactured part. The stages of preparation for the implementation of the system are described, starting with the analysis of the market of necessary software products and ending with the adaptation of the licensed system to the conditions of use in the educational process of the university. A link is given to the description of the methodology used in the assessment of automated systems at the stage preceding the tender for their purchase. It is emphasized that the study of the possibility of using a CAD/CAM system in the preparation of design engineers was carried out by students during the course and diploma projects in the discipline "Automated systems for technological preparation of production". The methodology for designing control programs used by students is given, and the results obtained are assessed.

Keywords: *training of design engineers, control software, CAD/CAM system, software-controlled equipment.*

Introduction

The modern stage of development of CAD-systems (Computer-Aided Design) is characterized by a significant expansion of the scope of their use. Now it is quite simple to obtain a 3D model of a part from a 2D drawing (and, vice versa), while it became possible to quickly and accurately determine a number of parameters, such as the weight of the part, its surface area, coordinates of the center of gravity and moments of inertia relative to the X, Y, Z axes. An interesting direction for improving CAD-systems is their integration with CAM-systems (Computer-Aided Manufacturing). One of the main tasks solved by CAM systems is the development of control programs for CNC machines.

Many software developers for automation of design and technological preparation of production have already equipped their systems with appropriate modules.

Firm "Ascon" has integrated into the system of three-dimensional modeling KOMPAS-3D module CNC, which allows you to receive control programs for various types of processing.

Firm "Top-Systems" has supplemented the T-FLEX CAD computer-aided design system with the T-FLEX CNC option.

1. Purpose of the study

These circumstances pose an urgent task for higher educational institutions to introduce the study of integrated CAD/CAM systems into the educational process of training design engineers. In this case, the emphasis should be placed on the practical mastery of the skills of developing control programs using a 3D-model of the manufactured part.

At the stage of choosing an automated system for obtaining control programs for further use in the educational process of the Sukhoi State Technical University of Gomel, the technique described in [9] was used.

2. The sequence of the research

Preparation for implementation in the educational process of designing using CAD/CAM systems consisted of the following stages:

1. Purchase of licensed software for 20 users, namely, T-FLEX CAD 3D and T-FLEX CNC 3D systems.
2. Installation and adaptation of the specified software to the conditions of use in the educational process of the Sukhoi State Technical University of Gomel.

3. Preparation of educational and methodological literature containing guidance on the use of a CAD / CAM system in course and diploma design. The features of this stage are described in [10].

The study of the possibility of using a CAD / CAM system in the training of design engineers was carried out by students of the specialty 1–53 01 01 “Automation of technological processes and production (by directions)” when performing a course project in the discipline “Automated systems for technological preparation of production” and when completing a diploma project.

The development of the control program was carried out in the T-Flex CAD computer-aided design system using the T-FLEX: CNC option.

To obtain the control program, the following steps were performed:

1. Using the “Tool Editor” command, a cutting tool with the required parameters was created and saved in a file with the “.too” extension (Fig. 1);

2. On the toolbar, the command “Drilling 5D” was selected, and in it the name of the operation, the tool, the surface relative to which the machining is performed and the drilling parameters (depth, speed, feed, etc.). The results of this processing are shown in Fig. 2–4;

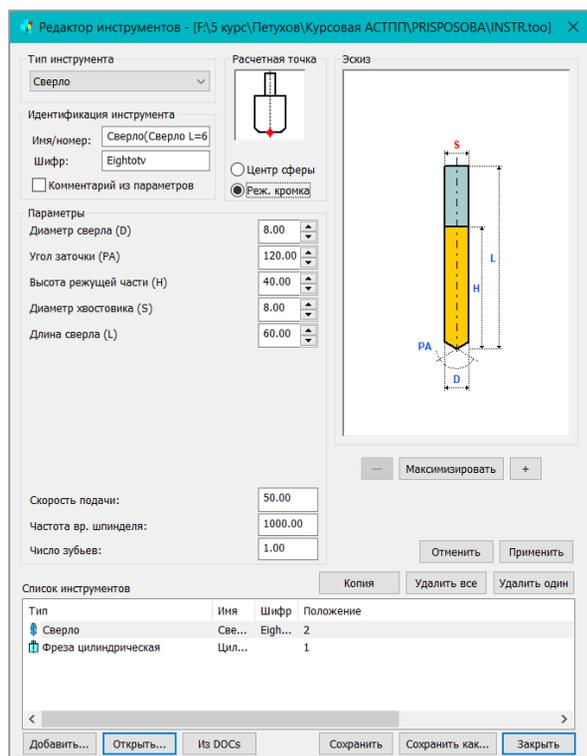


Fig. 1. Tool editor



Fig. 2. Vector diagram of drilling

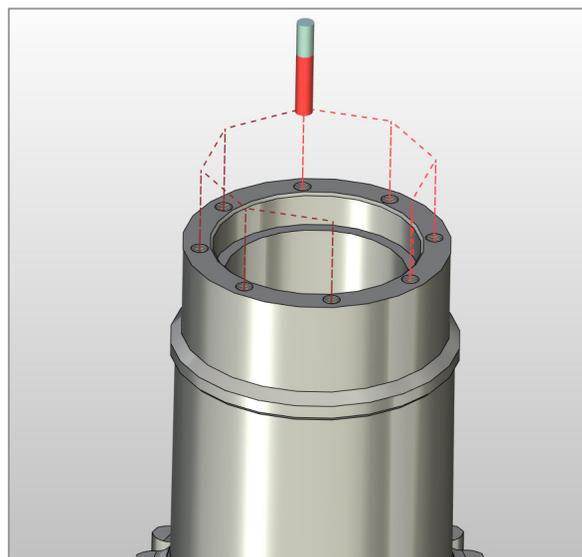


Fig. 3. Drill in start position (Block N105)

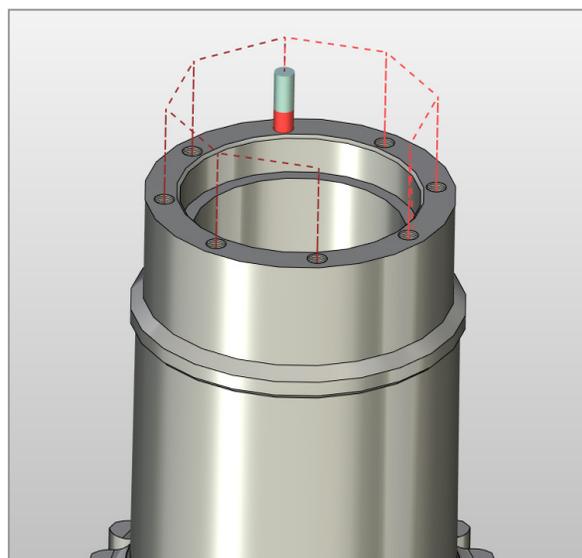


Fig. 4. Drill in end position (Block N115)

3. On the toolbar, the command “3D milling” was selected, and in it the name of the operation, the tool, the face that will be milled, the angle of inclination of the tool, the type of pass and the milling parameters (depth, speed, feed, etc.). The results of this processing are shown in Fig. 5–7;

4. To check the developed program, the “Processing simulator” command was launched, during which the tool path was presented in the form of a video;

5. The result obtained in the form of a control program presented in fig. 8 was saved in a file for transfer to the machine.

6. To check the developed program, the “Processing simulator” command was launched, during which the tool path was presented in the form of a video.

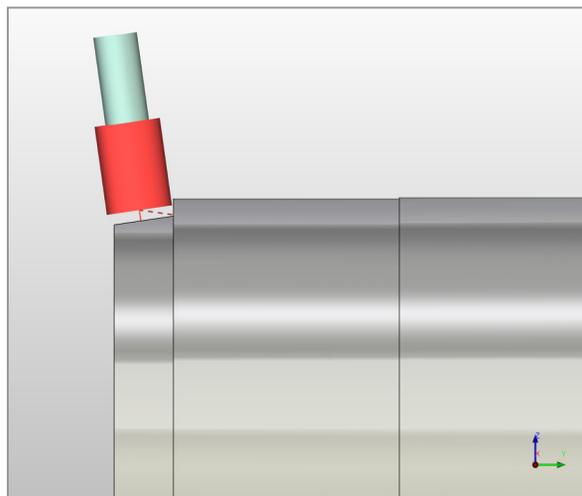


Fig. 5. Approach cutter (Block N220)

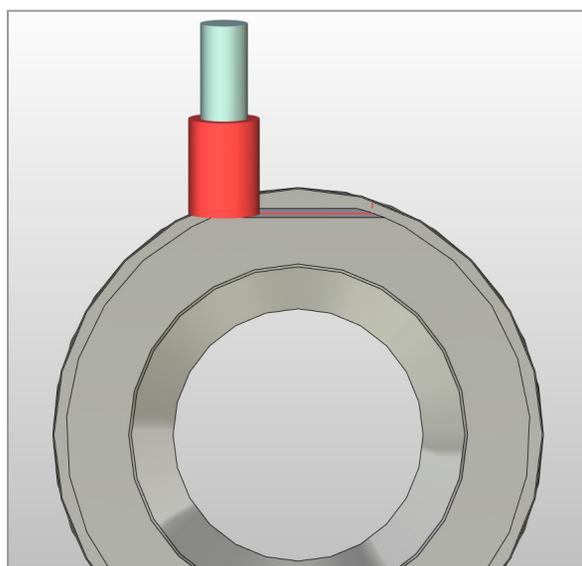


Fig. 6. Bevel milling (Blocks N230-N235)

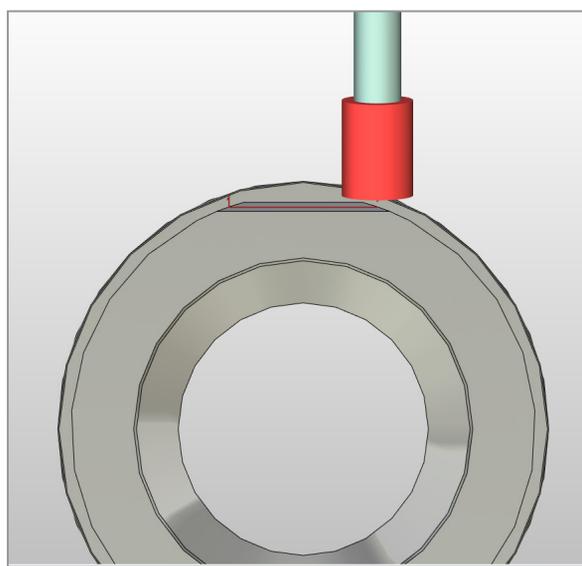


Fig. 7. Cutter retraction (Block N245)v

```
N195G90
N200M03
N205S1000
N210F50
N215F1000
N220G00X-31.1305Y11.4865Z97.1635B7.99999C-90
N225F50
N230G01X-31.1305Y12.1824Z92.2121B7.99999C-90
N235X31.1266
N240F1000
N245G00X31.1266Y11.4865Z97.1635B7.99999C-90
N250M11
N255M02
N260M30
```

Fig. 8. Listing of the control program:
Operation 030 Horizontal milling
(Cylindrical mill L=80 D=30)

Conclusion

The introduction of an integrated design system into the educational process has shown not only the possibility of obtaining a control program for a CNC machine tool, but also the practical implementation of this possibility by students on the basis of licensed software. The results, in the form of control programs obtained in the course of diploma design using integrated CAD/CAM systems, were highly appreciated by the members of the State Examination Commission

REFERENCES

1. **Akulovich L.M., Sheleg V.K.** Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii [Fundamentals of computer-aided design of technological processes in mechanical engineering]. Minsk: New knowledge Publ., 2012. – 488 p. (in Russian).
2. **Epifanova O.V., Troickij D.I.** Avtomatizaciya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva detalej, izgotavlivaemykh na oborudovanii s CHPU [Automation of technological preparation for the production of parts manufactured on CNC equipment]. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya TulGU. Technical science] № 3. Tula: TulGU Publ., 2011. – p. 53–61. (in Russian).
3. **Epifanova O.V., Troickij D.I.** Metodika optimal'nogo vybora struktury CAM-sistemy [Methodology for the optimal selection of the structure of the CAM system] Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya TulGU. Technical science] № 3. Tula: TulGU Publ., 2011. – p. 21–29. (in Russian).
4. **Grabchenko A.I., Vnukov Yu. N., Dobroskok V.L.** Integrirovannye generativnye tekhnologii [Integrated Generative Technologies]. Kharkiv: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (NTU «KhPI») Publ., 2011. – 416 p. (in Russian).
5. Oficial'nyj sayt firmy ASKON [ASCON official website] Available at: www.ascon.ru (accessed: 12.11.2013) (in Russian).
6. Oficial'nyj sayt kompanii «Top Sistemy» [Official site of the company “Top Systems”] Available at: www.tflex.ru (accessed: 12.11.2013) (in Russian).
7. Oficial'nyj sayt kompanii INTERMEKH [The official website of the company INTERMEKH] Available at: www.intermech.ru (accessed: 12.11.2013) (in Russian).
8. **Pestrecov S.I.** CALS-tekhnologii v mashinostroenii: osnovy raboty v CAD/CAE-sistemah [CALS-technologies in mechanical engineering: the basics of working in CAD / CAE-systems] Tambov: Tambov State Technical University Publ., 2010. – 104 p. (in Russian).
9. **Petukhov A.V.** Formalization of the problem of selection of automated system. «System analysis and applied information science». 2018;(1):16–20. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-1-16-20>
10. **Petukhov A.V.** Digital Transformation of Technological Design in the Preparation of Design Engineers: History and Prospects. Digital Transformation. 2020;(1):57–72. <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-1-57-72>
11. **Poletaev V.A.** Komp'yuterno-integrirovannye proizvodstvennyye sistemy: uchebnoe posobie [Computer-integrated production systems: study guide] Kemerovo. Kuzbass State Technical University Publ., 2011. 201 p. (in Russian).
12. **Ruseckij A.M., Vityaz' P. A., Hejfec M.L.** Avtomatizaciya i upravlenie v tekhnologicheskikh kompleksah [Automation and control in technological complexes]. Minsk: Belarusian Science Publ., 2014. – 375 p. (in Russian).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акулович, Л.М.** Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / Л.М. Акулович, В.К. Шелег. – Минск: Новое знание; М.: МЕФРА-М, 2012. – 488 с.
2. **Епифанова О.В., Троицкий Д.И.** Автоматизация технологической подготовки производства деталей, изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – с. 53–61
3. **Епифанова О.В., Троицкий Д.И.** Методика оптимального выбора структуры САМ-системы // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. – с. 21–29
4. **Грабченко, А.И.** Интегрированные генеративные технологии: учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок; под ред. А
5. Официальный сайт фирмы АСКОН / АСКОН // [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: www.ascon.ru – Дата доступа: 12.11.2013 г.
6. Официальный сайт компании «Топ Системы» / Топ Системы // [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: www.tflex.ru – Дата доступа: 12.11.2013 г.
7. Официальный сайт компании ИНТЕРМЕХ / ИНТЕРМЕХ // [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: www.intermech.ru – Дата доступа: 12.11.2013 г.
8. **Пестрецов, С. И.** CALS-технологии в машиностроении: основы работы в CAD/CAE-системах: учебное пособие / С.И. Пестрецов. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 104 с.
9. **Петухов А.В.** Формализация задачи выбора автоматизированной системы. «Системный анализ и прикладная информатика». 2018;(1):16–20. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2018-1-16-20>
10. **Петухов А.В.** Цифровая трансформация проектирования технологических процессов при подготовке инженеров-проектировщиков: история и перспективы. Цифровая трансформация. 2020;(1):57–72. <https://doi.org/10.38086/2522-9613-2020-1-57-72>
11. **Поletaев, В.А.** Компьютерно-интегрированные производственные системы: учеб. пособие / В.А. Поletaев – Кемерово, Кузбас. гос. техн. ун-н., 2011. – 201 с.
12. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А.М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская Наука, 2014. – 375 с.

Поступила
18.12.2020

После доработки
01.03.2021

Принята к печати
01.03.2021

ПЕТУХОВ А. В.

ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

Современный этап развития САД-систем (Computer-Aided Design) характеризуется значительным расширением сфер их использования. Интересным направлением совершенствования САД-систем является их интеграция с САМ-системами (Computer-Aided Manufacturing). Одной из главных задач, решаемых САМ-системами, является разработка управляющих программ для станков с ЧПУ.

Многие разработчики программного обеспечения для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства уже оснастили свои системы соответствующими модулями.

Указанные обстоятельства ставят перед высшими учебными заведениями актуальную задачу ввести изучение интегрированных САД/САМ-систем в учебный процесс подготовки инженеров-проектировщиков. Упор при этом нужно сделать на практическое овладение навыками разработки управляющих программ с использованием 3D-модели изготавливаемой детали.

Описаны этапы подготовки к внедрению системы, начиная с анализа рынка необходимых программных продуктов и заканчивая адаптацией лицензированной системы к условиям использования в учебном процессе университета. Дается ссылка на описание методики, используемой при оценке автоматизированных систем на стадии, предшествующей проведению тендера на их закупку. Подчеркнуто, что исследование возможности использования САД/САМ-системы при подготовке инженеров-проектировщиков было проведено студентами при выполнении курсового и дипломного проектов по дисциплине «Автоматизированные системы технологической подготовки производства». Приводится методика проектирования управляющих программ, используемая студентами, и дается оценка полученных результатов.

Ключевые слова: *подготовка инженеров-проектировщиков, управляющая программа, САД/САМ-система, программно-управляемое оборудование.*



Петухов Александр Владимирович – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»

Petuhov Aleksandr Vladimirovich Senior lecturer of the chair «Technology of mechanical engineering» of the Sukhoi State Technical University of Gomel.

E-mail: Petukhov@tut.by

ОТ РЕДАКЦИИ

Уважаемые авторы!

Общими критериями для публикации статей в журнале являются актуальность, новизна материала и его ценность в теоретическом и/или прикладном аспектах.

С целью приведения элементов данных, содержащихся в журнале, в соответствие международным требованиям зарубежных аналитических информационных систем (индексов цитирования), используемых для оценки деятельности учреждений образования при расчете показателей в международных рейтингах университетов, редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции приближения к унифицированной системе цитирования научных публикаций SCOPUS,

С 2016 г. Редколлегия журнала предлагает руководствоваться Правилами в приведенной ниже редакции.

Правила для авторов

1. Общие требования

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

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, почтовый адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание, должность. При наличии нескольких авторов должен быть указан автор, ответственный за переписку.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются.

При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

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

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

2. Правила оформления статей

2.1. Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

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

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

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

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

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

2.3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже, должность, ученая степень и ученое звание печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

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

2.5. Полное название организации (организаций), в которой работает (учится) автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру, После названия организации пропускается две строки, далее следует адрес (адреса) электронной почты, пропускается две строки.

2.6. Аннотация и ключевые слова (объем 200–250 слов на русском (англ.) языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, межстрочный интервал 1,15 пт, курсив, выравнивается по центру. Аннотация должна содержать (рекомендованная структура): цель и задачи работы, методы исследований, результаты, выводы. Аннотация должна быть пригодна для опубликования отдельно от статьи. Английский

вариант не должен быть механическим переводом русского текста, а обеспечивать понимание сути работы для иностранных читателей. После аннотации пропускается одна строка.

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

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

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

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

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

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

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]).

В статьях на русском языке должно быть до 10 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. В англоязычных статьях должно быть до 30 источников, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования. Обзорные статьи должны включать до 50 ссылок, включая статьи из международных журналов, а также ссылки на собственные исследования.

Список источников должен оформляться на русском и английском языках.

С целью повышения цитирования авторов в журнале проводится транслитерация русскоязычных источников с использованием официальных кодировок в следующем порядке: имена авторов транслитерируются латиницей, название статьи – смысловой транслитерацией (перевод на английский язык), название источника, где опубликована работа, транслитерируется латиницей, если у источника (журнала) нет официального названия на английском языке).

Для удобства транслитерации возможно использование онлайн-сервисов: <http://www.translit.ru>.

Все русскоязычные источники литературы должны быть представлены в транслитерированном варианте. За правильность приведенных в списке литературы данных ответственность несут автор(ы). В списке должны иметь место ссылки на издания, включенные в международные базы цитирования Scopus и Web of Science).

2.9. После *списка литературы* на русском и английском языках в статье на русском (англ.) языке должно следовать название статьи, список авторов, сведения о них и аннотация на английском (русском) языке.

Далее указывается: грант, гос. программа, тема госбюджетной НИР (№ Гос. регистрации) или иной документ, в рамках которой выполнена работа (или инициативная).

2.10. *Резюме авторов* (шрифтом TimesNewRoman, 10 пт.,) сопровождается фотографией (3×4 см.), JPG.

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

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

