

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Математическая модель оценки вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в условиях неопределенности О.В. Петрова, С.В. Иванов, И.Д. Королев, Д.Г. Белоножко.....	7
Определение параметров управляющих устройств в сложных системах управления с использованием компьютерного моделирования в среде Matlab+Simulink А.М. Литвиненко, Л.Б. Афанасьевский, А.Н. Горин, М.А. Чурсин.....	16
Параметризация твердотельных моделей с использованием NX Open А.М. Нужный, М.В. Веркошанский, Н.И. Гребенникова, С.Л. Кенин.....	24
Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких сетей Петри типа V_f В.А. Мустафаев, М.Н. Салманова.....	28
Обработка и распознавание изображений объектов, полученных посредством системы технического зрения летательного аппарата В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, А.В. Николенко, К.Ю. Гусев.....	34
Синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, А.В. Иванов, О.А. Орловцева, И.В. Иванова.....	42
Имитационное моделирование гибкой производственной системы на базе автоматизированного сборочно-монтажного цеха Д.П. Лашенов, В.Л. Бурковский.....	51
Вычислительный эксперимент для оценки рисков несвоевременного завершения обслуживания заявок С.А. Олейникова, К.Е. Киселев, И.А. Селищев.....	57
Анализ взаимного теплообмена ребристой поверхности в электротехническом комплексе А.И. Борисова, В.Л. Бурковский, Ю.В. Писаревский, В.Б. Фурсов.....	63

Радиотехника и связь

Современные методы оценки канала радиосвязи в условиях многолучевости О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, М.Ю. Чепелев.....	68
Технические характеристики комплекса средств спутниковой радиосвязи с беспилотными летательными аппаратами Н.Н. Долженков, Д.Г. Пантенков, А.Т. Егоров, А.А. Ломакин, В.П. Литвиненко, В.И. Великоиваненко, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю.....	74
Последовательный LDPC-декодер, работающий по алгоритму min-sum, и его реализация на ПЛИС А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова.....	83
Методика обеспечения тепловых режимов радиоэлектронных устройств с мощными светодиодами А.С. Кушнарёв, О.Ю. Макаров.....	90

Обоснование требований к комплексу измерения характеристик радиотепловой заметности объектов М.Г. Калашников, В.Г. Керков, Г.Л. Тюрин.....	96
Интегрированный комплекс дальней радиосвязи для повышения эффективности решения целевых задач беспилотными летательными аппаратами Н.Н. Долженков, Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко, А.А. Ломакин, А.Т. Егоров, А.А. Гриценко.....	102
Разработка емкостного электрода для регистрации биомедицинских показателей Д.В. Журавлев, И.А. Сафонов, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов.....	109
Машиностроение и машиноведение	
Моделирование процесса фильтрации газа пористыми титановыми средами И.Б. Корчагин, В.В. Пешков, П.П. Чехлыстов.....	116
Механизм комбинированной обработки в кавитационном режиме О.В. Скрыгин, В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова.....	122

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Mathematical model of the evaluation of the probability of the unreliable work of the processing system of information of the multi-agent robotic complex in uncertainty conditions O.V. Petrova, S.V. Ivanov, I.D. Korolev, D.G. Belonozhko.....	7
Determination of parameters of control devices in complex control systems using computer simulation in Matlab + Simulink environment A.M. Litvinenko, L.B. Afanas'evskiy, A.N. Gorin, M.A. Chursin.....	16
Parametrization of solid models using NX Open A.M. Nuzhnyy, M.V. Verkoshanskiy, N.I. Grebennikova, S.L. Kenin.....	24
Modeling dynamic interaction processes using fuzzy Petri nets of V_f type V.A. Mustafaev, M.N. Salmanova.....	28
Processing and recognition of object images obtained via the machine vision system of an aircraft V.G. Bondarev, D.A. Smirnov, N.A. Maygurova, A.V. Nikolenko, K.Yu. Gusev.....	34
Synthesis of adaptive digital control system with a specified stability resource V.S. Kudryashov, M.V. Alekseev, A.V. Ivanov, O.A. Orlovtsava, I.V. Ivanova.....	42
Simulation of a flexible production system on the basis of an automated assembly shop D.P. Lashchenov, V.L. Burkovskiy.....	51
Computational experiment for risk assessment of untimely completion of applications service S.A. Oleynikova, K.E. Kiselev, I.A. Selishchev.....	57
Analysis of mutual heat exchange of a ribbed surface in an elektrotekhnikal complex A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy, Yu.V. Pisarevskiy, V.B. Fursov.....	63

Radio engineering and communication

Modern methods of radiocommunication channel estimation in conditions of multipath O.N. Chirkov, M.A. Romashchenko, M.Yu. Chepelev.....	68
Technical characteristics of the means for satellite radiocommunication with unmanned aerial vehicles N.N. Dolzhenkov, D.G. Pantenkov, A.T. Egorov, A.A. Lomakin, V.P. Litvinenko, V.I. Velikoivanenko, E.Yu. Lu-Ke-Syu.....	74
Serial LDPC decoder working for min-sum algorithm and its implementation on FPGA A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova.....	83
Methodology of optimizing thermal regimes of radioelectronic devices with powerful led A.S. Kushnaryev, O.Yu. Makarov.....	90
Substantiation of requirements to the complex of measurement of the characteristics of radio thermal notice of objects M.G. Kalashnikov, V.G. Kerkov, G.L. Tyurin.....	96
Integrated complex of the long-distance radiocommunication for increase efficiency of the solution of target tasks by unmanned vehicle N.N. Dolzhenkov, D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko, A.A. Lomakin, A.T. Egorov, A.A. Gritsenko.....	102

Development of capacitive electrodes for the recording of biomedical indicators D.V. Zhuravlev, I.A. Safonov, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov.....	109
--	------------

Mechanical engineering and science of machines

Modeling of gas filtration process by porous titanium media I.B. Korchagin, V.V. Peshkov, P.P. Chekhlystov.....	116
Mechanism of combined treatment in the cavitation mode O.V. Skrygin, V.P. Smolentsev, A.A. Shirokzhukhova.....	122

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.3.001

УДК 629.7.017.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНОГО РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

О.В. Петрова, С.В. Иванов, И.Д. Королев, Д.Г. Белоножко

Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия

Аннотация: особенностью функционирования автономных мобильных роботов, в том числе и беспилотных летательных аппаратов (БЛА), является высокий уровень неопределенности, что вызвано непредсказуемостью внешней среды, высокой размерностью пространства состояний, отсутствием точных математических моделей, иерархичностью принимаемых решений по управлению. Рассматривается решение задачи поиска вероятностной характеристики нахождения мультиагентного робототехнического комплекса в конкретных состояниях функционирования в режиме обмена информацией. Актуальность данной проблемы заключается в том, что один робот не может выполнять большое количество разноплановых задач, что характеризуется большим потоком информации, передаваемой по каналам управления. В связи с этим возникает необходимость обеспечения достаточной пропускной способности канала управления группой агентов. Выполнение стоящих перед мультиагентным робототехническим комплексом разноплановых задач возможно только при использовании многоканальной системы передачи информации. В работе приведен анализ принципов работы многоканальной системы передачи информации в канале управления. Анализ показал, что для решения задачи обеспечения передачи информации как внутри комплекса между агентами, так и во внешней среде, целесообразно использовать многоканальную систему передачи информации с разной пропускной способностью каналов, при этом должен быть определен основной канал и запасные, которые подключаются к работе при невозможности основным каналом обрабатывать все поступающие заявки с вероятностью 0,95. Целью данной работы является оценка вероятности безотказной работы системы обработки информации мультиагентного робототехнического комплекса в режиме передачи информации при возникновении большой нагрузки на канал управления с особой спецификацией. Для достижения данной цели в работе в качестве многоканальной системы передачи информации рассматривается многоканальная система массового обслуживания (СМО) с разной пропускной способностью каналов

Ключевые слова: большой поток информации, робототехнический комплекс, беспилотный летательный аппарат, многоканальная система обработки информации, система массового обслуживания, киберфизические системы

Введение

Автоматизированные и роботизированные системы обладают неразрывной связью между входящими в них вычислительными и физическими элементами. Сегодня представители таких систем могут быть найдены в самых разнообразных областях - космос, автомобильная, химическая технология, гражданская инфраструктура, энергетика, здравоохранение, производство, транспорт и потребительские устройства. Такой класс систем рассматривается как киберфизические системы [1].

С одной стороны, киберфизические системы за счет распределенной сети датчиков и блоков управления позволяют решить многие практические задачи, позволяющие сэкономить

время и уменьшить человеческие потери, за счет выполнения опасных заданий роботизированными системами [2].

С другой стороны, за счет использования открытых радиоканалов и протоколов киберфизические системы подвержены воздействию компьютерных атак, которые в наилучшем случае могут привести к нарушению работоспособности сети, а в худшем к перехвату управления [3].

При исследовании реальных или проектируемых систем обработки информации и управления применяют методы математического моделирования.

С учетом того, что системы обработки и управления информационными потоками в мультиагентных робототехнических системах в настоящее время, в основном, имеют много-машинную (многопроцессорную) структуру,

целесообразно использовать модели многоканальной системы массового обслуживания. При этом в системах процессоры отождествляются с каналами обслуживания, а задачи - с заявками. Появление систем, адаптируемых к задачам, т.е. меняющих конфигурацию в зависимости от заявок, обусловило необходимость создания адекватных математических моделей систем с перестраиваемой структурой [4].

В качестве объекта рассматривается мультиагентная робототехническая система, функционирующая в условиях неопределенности внешней среды. Ввиду того, что масштабность существующих на сегодняшний день задач, стоящих перед роботами мультиагентной системы, накладывает серьезные ограничения, связанные с вопросами обеспечения оперативной передачи и обработки информации, стоит задача построения модели рационального и

оперативного перераспределения информационных ресурсов в системе, состоящей из большого количества агентов в составе группы.

Проблема многоканальной системы передачи информации в современное время становится особенно актуальна в связи с тем, что возможности одиночного робота весьма ограничены и отсутствует возможность выполнения им разноплановых задач, что, в свою очередь, требует использования многомашинной структуры канала передачи информации с целью обработки большого количества информационных потоков с учетом воздействия внешней среды с большой интенсивностью. Выполнение разноплановых задач мультиагентным робототехническим комплексом возможно только при наличии многоканальной системы передачи информации (рис. 1).

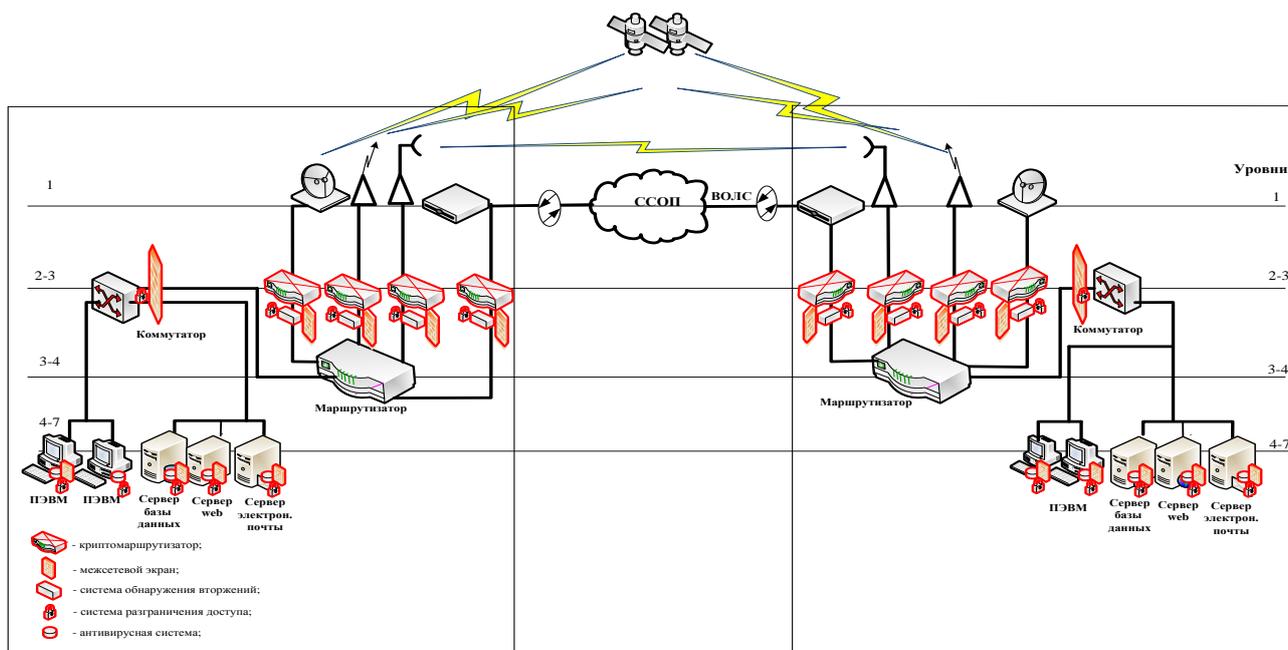


Рис. 1. Информационно-телекоммуникационная сеть управления мультиагентным робототехническим комплексом (группой БЛА)

Постановка задачи

Рассмотрим многоканальную систему передачи информации, построенную на основе многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с разной пропускной способностью каналов.

Такая система имеет основной канал передачи информации и два запасных. Структура системы представлена на рис. 2.

Введем ограничение: при включении запасных каналов иерархия каналов определяется случайным образом, каналы выбираются последовательно, т.е. заявки направляются на первый канал, если он занят, то на второй канал, если первый и второй каналы заняты, то заявка поступает на третий канал, и каналы освобождаются поочередно в обратном порядке.

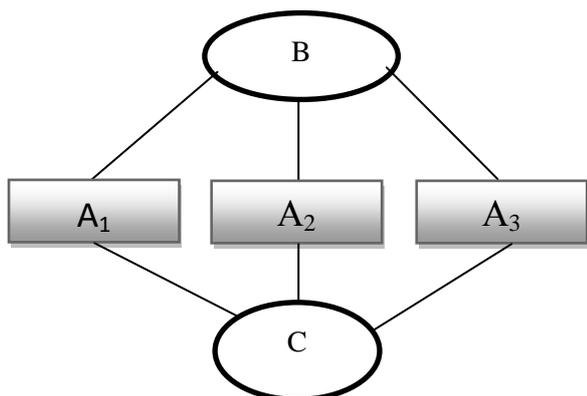


Рис. 2. Структура многоканальной системы передачи информации:

где B – подсистема, распределяющая заявки по каналам;
 A_1 – основной канал передачи информации, обрабатывающий заявки с пропускной способностью μ_0 ;
 A_2, A_3 – резервные каналы обработки информации с пропускными способностями μ_1 и μ_2 соответственно;
 C – защищаемая автоматизированная система специального назначения

При начале поступления потока информации от одного агента другому увеличивается нагрузка на основной канал передачи информации A_1 , при этом увеличивается вероятность отказа в обработке очередной заявки. В этом случае целесообразно посылать очередные заявки не только на основной канал, но и на резервные.

Причем получение этих заявок рассматривается как простейший поток событий со следующими параметрами:

λ – плотность потока (среднее число событий, приходящееся на единицу времени);

$F(t) = P(T < t) = 1 - e^{-\lambda t}$ – закон распределения вероятности появления 1 события за время t ;

$P_0(t) = e^{-\lambda t}$ – вероятность того, что за время t не придет ни одна заявка.

Подсистема B распределяет заявки по каналам A_1, A_2, A_3 случайным образом.

На каналах происходит обработка поступивших заявок, причем время обработки заявки на каждом из каналов распределено по показательному закону распределения:

$$g(t) = \mu_i e^{\mu_i t}, (i = 0, 1, 2),$$

$$\mu_i = \frac{1}{m_{t_{\text{опт}}}}, (i = 0, 1, 2).$$

СМО рассматривается с момента времени, когда значение параметра λ достигло критиче-

ской величины для основного канала и заявки начали поступать на запасные каналы передачи информации.

Рассмотрим случай, когда подсистема распределения каналов выбрала первым канал A_1 , вторым канал A_2 , третьим канал A_3 .

Функционирование многоканальной системы передачи информации между группой агентов и внешней средой будем рассматривать как совокупность ее состояний.

Найдем вероятность безотказной работы данной системы.

При заданных условиях данная система передачи информации представлена как трехканальная СМО с отказами, причем обработка запросов на каждом канале происходит с разной интенсивностью [5]. Тогда для описания данной модели каждому каналу присваивается свой строгий номер.

Для исследуемой системы определены следующие состояния:

x_0 – свободны все каналы;

x_1 – занят первый канал;

x_2 – заняты первые 2 канала;

x_3 – заняты все 3 канала.

Решение задачи

Определим вероятности состояния системы в каждый из моментов времени t ,

где параметр λ – плотность потока заявок, $\mu_i, (i = 0, 1, 2)$ – плотности потоков освобождений.

Рассмотрим возможные состояния системы и их вероятности $P_0(t), P_1(t), P_2(t)$, тогда в соответствии с формулой полной вероятности [6]:

$$\sum_{k=0}^3 P_k(t) = 1. \quad (1)$$

Составим дифференциальные уравнения для всех вероятностей состояний системы.

1. Зафиксируем момент времени t и найдем вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ система будет находиться в состоянии x_0 . Это возможно при:

A – в момент t система находилась в состоянии x_0 и за промежуток времени Δt не перешла в другое состояние.

B – в момент t система находилась в состоянии x_1 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_0 .

$$P_0(t + \Delta t) = P(A) + P(B). \quad (2)$$

Вероятность события A равна [7]:

$$P(A) = P_0(t)e^{-\lambda\Delta t} \approx P_0(t)(1 - \lambda\Delta t). \quad (3)$$

Вероятность события B равна:

$$P(B) = P_1(t)(1 - e^{-\mu_0\Delta t}) \approx P_1(t)\mu_0\Delta t. \quad (4)$$

Для описания вероятности пребывания системы в состоянии x_0 подставим в формулу (2) значения из формул (3, 4):

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_1(t)\mu_0\Delta t,$$

$$P_0(t + \Delta t) + P_0(t) = -P_0(t)\lambda\Delta t + P_1(t)\mu_0\Delta t.$$

Разделим обе части на t , при $t \rightarrow 0$ перейдем к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = P_0(t)\lambda + P_1(t)\mu_0. \quad (5)$$

2. Зафиксируем момент времени t и найдем вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ система будет находиться в состоянии x_1 . Это возможно при:

A – в момент t система находилась в состоянии x_1 и за промежуток времени Δt не перешла в другое состояние.

B – в момент t система находилась в состоянии x_2 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_1 .

C – в момент t система находилась в состоянии x_0 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_1 .

$$P_1(t + \Delta t) = P(A) + P(B) + P(C) \quad (6)$$

$$P(A) = P_1(t)e^{-(\lambda+\mu_0)\Delta t} \approx P_1(t) * (1 - (\lambda + \mu_0)\Delta t), \quad (7)$$

$$P(B) = P_2(t)(1 - e^{-\mu_1\Delta t}) \approx P_2(t)\mu_1\Delta t, \quad (8)$$

$$P(C) = P_0(t)e^{-\lambda\Delta t} \approx P_0(t)\lambda\Delta t. \quad (9)$$

Для описания вероятности пребывания системы в состоянии x_1 подставим в формулу (6) значения из формул (7-9):

$$P_1(t + \Delta t) = P_0(t)(1 - (\lambda + \mu_0)\Delta t) + P_1(t)\mu_1\Delta t + P_0(t)\lambda\Delta t.$$

Отсюда аналогично переходим к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = P_1(t)(\lambda + \mu_0) + P_2(t)\mu_1 + P_0(t)\lambda. \quad (10)$$

3. Зафиксируем момент времени t и найдем вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ система будет находиться в состоянии x_2 . Это возможно при:

A – в момент t система находилась в состоянии x_2 и за промежуток времени Δt не перешла в другое состояние.

B – в момент t система находилась в состоянии x_3 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_2 .

C – в момент t система находилась в состоянии x_1 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_2 .

$$P_2(t + \Delta t) = P(A) + P(B) + P(C), \quad (11)$$

$$P(A) = P_2(t)e^{-(\lambda+\mu_1)\Delta t} \approx P_2(t) * (1 - (\lambda + \mu_1)\Delta t), \quad (12)$$

$$P(B) = P_3(t)(1 - e^{-\mu_2\Delta t}) \approx P_3(t)\mu_2, \quad (13)$$

$$P(C) = P_1(t)e^{-\lambda\Delta t} \approx P_1(t)\lambda\Delta t. \quad (14)$$

Для описания вероятности пребывания системы в состоянии x_2 подставим в формулу (11) значения из формул (12-14):

$$P_2(t + \Delta t) = P_2(t)(1 - (\lambda + \mu_1)\Delta t) + P_3(t)\mu_2\Delta t + P_1(t)\lambda\Delta t.$$

Отсюда аналогично переходим к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = -P_2(t)(\lambda + \mu_0) + P_3(t)\mu_2 + P_1(t)\lambda. \quad (15)$$

4. Зафиксируем момент времени t и найдем вероятность того, что в момент времени $t + \Delta t$ система будет находиться в состоянии x_3 . Это возможно при:

A – в момент t система находилась в состоянии x_2 и за промежуток времени Δt не перешла в другое состояние.

C – в момент t система находилась в состоянии x_2 и за промежуток времени Δt перешла в состояние x_3 .

$$P_3(t + \Delta t) = P(A) + P(C). \quad (16)$$

$$P(A) = P_3(t)e^{-(\lambda+\mu_0+\mu_1)\Delta t} \approx P_3(t) * (1 - (\lambda + \mu_2)\Delta t). \quad (17)$$

$$P(C) = P_2(t)e^{-\lambda\Delta t} \approx P_2(t)\lambda\Delta t. \quad (18)$$

Для описания вероятности пребывания системы в состоянии x_3 подставим в формулу (16) значения из формул (17, 18):

$$P_3(t + \Delta t) = P_3(t)(1 - (\lambda + \mu_2)\Delta t) + P_2(t)\lambda\Delta t.$$

Отсюда аналогично переходим к дифференциальному уравнению:

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = -P_3(t)(\lambda + \mu_2) + P_2(t)\lambda. \quad (19)$$

Таким образом, получаем систему дифференциальных уравнений (5, 10, 15, 19):

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -P_0(t)\lambda + P_1(t)\mu_0 \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = -P_1(t)(\lambda + \mu_0) + P_2(t)\mu_1 + P_0(t)\lambda \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -P_2(t)(\lambda + \mu_1) + P_3(t)\mu_2 + P_1(t)\lambda \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -P_3(t)(\lambda + \mu_2) + P_2(t)\lambda \end{cases}$$

Найдем предельные вероятности состояний системы в установившемся режиме:

$$\begin{cases} 0 = -P_0\lambda + P_1\mu_0 \\ 0 = -P_1(\lambda + \mu_0) + P_2\mu_1 + P_0\lambda \\ 0 = -P_2(\lambda + \mu_1) + P_3\mu_2 + P_1\lambda \\ 0 = -P_3(\lambda + \mu_2) + P_2\lambda \end{cases} \quad (20)$$

Добавим условие (1) и из первого уравнения системы (20) получим:

$$P_1 = \frac{P_0\lambda}{\mu_0}. \quad (21)$$

Из второго уравнения системы (20) получим:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{P_1(\lambda + \mu_0) - P_0\lambda}{\mu_1} = \frac{\frac{(\lambda + \mu_0)P_0\lambda}{\mu_0} - P_0\lambda}{\mu_1} \\ &= \frac{(\lambda + \mu_0)P_0\lambda - \mu_0 P_0\lambda}{\mu_0\mu_1} \\ &= \frac{\lambda^2 P_0}{\mu_0\mu_1} \end{aligned} \quad (22)$$

Из третьего уравнения системы (20) получим:

$$\begin{aligned} P_3 &= \frac{P_2(\lambda + \mu_0 + \mu_1) - P_1\lambda}{\mu_2} = \frac{\frac{\lambda^2 P_0(\lambda + \mu_1) - P_0\lambda^2}{\mu_0\mu_1} - \frac{P_0\lambda^2}{\mu_0}}{\mu_2} = \\ &= \frac{\lambda^2 P_0(\lambda + \mu_1) - P_0\lambda^2 \mu_1}{\mu_0\mu_1\mu_2} = \frac{\lambda^3 P_0}{\mu_0\mu_1\mu_2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Подставив значения вероятностей из (21,22,23) в условие (1), имеем:

$$P_0 + \frac{P_0\lambda}{\mu_0} + \frac{\lambda^2 P_0}{\mu_0\mu_1} + \frac{\lambda^3 P_0}{\mu_0\mu_1\mu_2} = 1,$$

$$P_0 \left(1 + \frac{\lambda}{\mu_0} + \frac{\lambda^2 P_0}{\mu_0\mu_1} + \frac{\lambda^3 P_0}{\mu_0\mu_1\mu_2} \right) = 1,$$

$$P_0 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda}{\mu_0} + \frac{\lambda^2 P_0}{\mu_0\mu_1} + \frac{\lambda^3 P_0}{\mu_0\mu_1\mu_2} \right)},$$

$$P_0 = \frac{\mu_0\mu_1\mu_2}{\mu_0\mu_1\mu_2 + \lambda\mu_1\mu_2 + \lambda^2\mu_2 + \lambda^3}. \quad (24)$$

Подставив значение из (24) в уравнения (21, 22, 23), имеем:

$$P_1 = \frac{\mu_1\mu_2\lambda}{\mu_0\mu_1\mu_2 + \lambda\mu_1\mu_2 + \lambda^2\mu_2 + \lambda^3}, \quad (25)$$

$$P_2 = \frac{\mu_2\lambda^2}{\mu_0\mu_1\mu_2 + \lambda\mu_1\mu_2 + \lambda^2\mu_2 + \lambda^3}, \quad (26)$$

$$P_3 = \frac{\lambda^3}{\mu_0\mu_1\mu_2 + \lambda\mu_1\mu_2 + \lambda^2\mu_2 + \lambda^3}. \quad (27)$$

Выражение (27) определяет вероятность отказа системы при заданном порядке обработки поступающих запросов, а именно, поступление на каналы A_1, A_2, A_3 в строгом порядке, но так как заявки распределяются случайным образом, необходимо рассмотреть гипотезы о выборе порядка поступления заявок на каналы обработки информации [8]:

Γ_1 – пока не занят канал A_1 заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_2 , если и A_2 занят, то заявки поступают на A_3 ;

Γ_2 – пока не занят канал A_1 заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_3 , если и A_3 занят, то заявки поступают на A_2 ;

Γ_3 – пока не занят канал A_2 , заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_1 , если и A_1 занят, то заявки поступают на A_3 ;

Γ_4 – пока не занят канал A_2 , заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_3 , если и A_3 занят, то заявки поступают на A_1 ;

Γ_5 – пока не занят канал A_3 , заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_1 , если и A_1 занят, то заявки поступают на A_2 ;

Γ_6 – пока не занят канал A_3 , заявки поступают на него, если он занят, заявки поступают на A_2 , если и A_2 занят, то заявки поступают на A_1 .

Будем считать, что заявки распределены по каналам с вероятностями $P(\Gamma_i)$.

По формуле для полной вероятности:

$$P_{\text{отк}} = \sum_{i=1}^6 P(\Gamma_i) P_{\text{отк } \Gamma_i}, \quad (28)$$

где $P_{\text{отк } \Gamma_i}$ – вероятность отказа системы при принятии i -й гипотезы.

Получим выражения для поиска $P_{\text{отк } \Gamma_i}$ в соответствии с (27) и введенными гипотезами $\Gamma_1 - \Gamma_6$, учитывая смену порядка нумерации каналов:

$$P_{\text{отк } \Gamma_1} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_2 + \lambda^2 \mu_2 + \lambda^3}, \quad (29)$$

$$P_{\text{отк } \Gamma_2} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_2 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3}, \quad (30)$$

$$P_{\text{отк } \Gamma_3} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_0 \mu_2 + \lambda^2 \mu_2 + \lambda^3}, \quad (31)$$

$$P_{\text{отк } \Gamma_4} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_0 \mu_2 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3}, \quad (32)$$

$$P_{\text{отк } \Gamma_5} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_0 + \lambda^2 \mu_1 + \lambda^3}, \quad (33)$$

$$P_{\text{отк } \Gamma_6} = \frac{\lambda^3}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_0 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3}. \quad (34)$$

Подставив формулы (29-34) в формулу нахождения вероятности отказа системы (28), получим вероятность отказа всей системы:

$$P_{\text{отк}} = \lambda^3 \left(\frac{P(\Gamma_1)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_2 + \lambda^2 \mu_2 + \lambda^3} + \frac{P(\Gamma_2)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_2 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3} + \frac{P(\Gamma_3)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_0 \mu_2 + \lambda^2 \mu_2 + \lambda^3} + \frac{P(\Gamma_4)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_0 \mu_2 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3} + \right. \quad (35)$$

$$\left. \frac{P(\Gamma_5)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_0 + \lambda^2 \mu_1 + \lambda^3} + \frac{P(\Gamma_6)}{\mu_0 \mu_1 \mu_2 + \lambda \mu_1 \mu_0 + \lambda^2 \mu_0 + \lambda^3} \right).$$

Исходя из того, что в мультиагентном робототехническом комплексе обмен информацией осуществляется по нескольким каналам одновременно и обработка запросов производится с задержкой из-за отказов в системе, то возникает необходимость в подключении запасных каналов многоканальной системы обработки информации [9].

Тогда для определения вероятности безотказной работы многоканальной системы обработки информации целесообразно рассмотреть работу одного канала и по ее значению дать оценку работы всей многоканальной системы.

Для определения количества необходимых для работоспособного состояния системы каналов найдем значение плотности потока заявок, при которой необходимо подключать запасные каналы обработки информации.

Рассмотрим исследуемую подсистему как одноканальную систему массового обслуживания с отказами. Тогда вероятность отказа считается по формуле:

$$P_{\text{отк}} = \frac{\lambda}{1 + \frac{\lambda}{\mu_1}} = \frac{\lambda}{\mu_1 + \lambda}. \quad (36)$$

Так как для одноканальной системы передачи информации мультиагентного робототехнического комплекса допустимой вероятностью отказа является вероятность, значение которой не превышает 0,05, то мы можем найти максимально допустимое значение плотности потока заявок, при котором обеспечивается надежное безотказное состояние основного канала [10].

Вероятность отказа определяется по формуле:

$$P_{\text{отк}} \leq 0,05.$$

Учитывая то, что для одного канала $P_{\text{отк}} = \frac{\lambda}{\mu_1 + \lambda}$, справедливо следующее неравенство:

$$\frac{\lambda}{\mu_1 + \lambda} \leq 0,05,$$

с учетом ограничений $\mu_1 > 0$ и $\lambda > 0$ и начальных данных имеем:

$$\frac{0,95\lambda - 0,05\mu_1}{\mu_1 + \lambda} \leq 0. \quad (37)$$

Решая полученное неравенство

$$0,95\lambda - 0,05\mu_1 \leq 0,$$

получим выражение для определения границ плотности потока заявок:

$$\lambda \leq 1/19\mu_1. \quad (38)$$

Таким образом, при значениях плотности потока заявок, не удовлетворяющих условию (38), необходимо подключать запасной канал обработки информации A_2 для обеспечения безотказной работы системы передачи информации мультиагентного робототехнического комплекса.

Найдем вероятность отказа данной системы при включении запасного канала A_2 .

Для этого рассмотрим данную систему как двухканальную СМО с отказами.

Имеем следующие состояния системы:

x_0 – свободны все каналы;

x_1 – занят первый канал;

x_2 – заняты первые 2 канала.

Пользуясь рассуждениями, описанными в [11], найдем вероятность отказа данной системы:

$$\begin{cases} 0 = -P_0\lambda + P_1\mu_0 \\ 0 = -P_1(\lambda + \mu_0) + P_2\mu_1 + P_0\lambda \\ 0 = -P_2(\lambda + \mu_1) + P_1\lambda \\ \sum_{k=0}^2 P_k(t) = 1 \end{cases} \quad (39)$$

$$P_1 = P_0\lambda/\mu_0 \quad (40)$$

$$P_2 = \frac{\lambda^2 P_0}{\mu_0 \mu_1} \quad (41)$$

$$P_0 = \frac{\mu_0 \mu_1}{\mu_0 \mu_1 + \lambda \mu_1 + \lambda^2}. \quad (42)$$

Подставим значение из (41) в уравнения (39, 40):

$$P_1 = \frac{\lambda \mu_1}{\mu_0 \mu_1 + \lambda \mu_1 + \lambda^2}$$

$$P_{\text{отк}} = \frac{\lambda^2}{\mu_0 \mu_1 + \lambda \mu_1 + \lambda^2}. \quad (43)$$

Найдем максимальное допустимое значение плотности потока заявок, при котором обеспечивается надежное безотказное состояние основного и одного из запасных каналов:

$$P_{\text{отк}} \leq 0,05.$$

По аналогии с математическими выкладками для одноканальной системы получим:

$$\frac{\lambda^2}{\mu_0 \mu_1 + \lambda \mu_1 + \lambda^2} \leq 0,05$$

$$\frac{0,95\lambda^2 - 0,05\lambda\mu_1 - 0,05\mu_0\mu_1}{\mu_0 \mu_1 + \lambda \mu_1 + \lambda^2} \leq 0$$

Из выражения видно, что знаменатель больше нуля:

$$0,95\lambda^2 - 0,05\lambda\mu_1 - 0,05\mu_0\mu_1 \leq 0.$$

Используя метод интервалов, получаем:

$$\frac{\mu_1 - \sqrt{\mu_1^2 + 76\mu_0\mu_1}}{38} \leq \lambda \leq \frac{\mu_1 + \sqrt{\mu_1^2 + 76\mu_0\mu_1}}{38}.$$

Так как плотность потока заявок положительна, то в результате получаем неравенство для определения максимального допустимого значения плотности потока заявок, при котором обеспечивается надежное безотказное состояние основного и одного из запасных каналов:

$$0 \leq \lambda \leq \frac{\mu_1 + \sqrt{\mu_1^2 + 19\mu_0\mu_1}}{38}. \quad (44)$$

Таким образом, при значениях плотности потока заявок, не удовлетворяющих условию (44), необходимо подключать второй запасной канал обработки информации A_3 для обеспечения безотказной работы системы передачи информации мультиагентного робототехнического комплекса.

Построенная модель является универсальной и позволяет учитывать возможности многоканальной системы независимо от гипотез о выборе порядка поступления заявок на каналы обработки больших потоков информации.

Заключение

Таким образом, была построена математическая модель нахождения вероятности отказа многоканальной системы передачи информации мультиагентного робототехнического комплекса, которая позволила оценить работоспособное состояние данной системы и правильно реагировать на внешние воздействия, изменяя пропускную способность каналов.

В перспективе развития данной темы планируется найти значения плотности потока заявок, при которых целесообразно подключать

первый и второй запасные каналы, описать систему поддержки принятия решений при выборе канала для обработки очередной заявки.

Литература

1. Защита канала управления роботизированных систем / В.В. Баранов, М.А. Гудков, А.М. Крибель, О.С. Лаута, А.П. Нечепуренко // Актуальные проблемы обеспечения информационной безопасности: тр. междуз. науч.-практ. конф. 2017. С. 32-37.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 280.
3. Модель распределения факторов информационного воздействия по элементам информационно-телекоммуникационной сети / Д.А. Иванов, М.А. Коцыняк, О.С. Лаута, А.П. Нечепуренко // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании: сб. науч. ст. 2017. С. 420-425.
4. Моржов С.В., Хорошко В.А., Бенасер Карим. Обработка информационных потоков в многомашинных системах // Проблемы управления и информатики. 2000. № 2. С. 116-120.
5. Матвеев В.Ф., Ушаков В.Г. Системы массового обслуживания. М.: Изд-во МГУ, 1984.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 2010. С. 596-628.
7. Коценьяк М.А., Кулешов И.А., Лаута О.С. Устойчивость информационно-телекоммуникационных сетей. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. 92 с.
8. Королев И.Д., Петрова О.В. Разработка модели защиты информации, обрабатываемой в вычислительных сетях, от компьютерных атак // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. Приложение № 1. С. 68-73.
9. Королев И.Д., Петрова О.В., Сураев А.С. Разработка модели защиты информации, обрабатываемой в вычислительных сетях, от компьютерных атак // Сборник трудов. Краснодар: ФВАС, 2011. С. 34-40.
10. Модель защищенности комплекса средств автоматизации специального назначения/ И.Д. Королев, О.В. Петрова, Д.В. Мальшев, К.В. Пугин, И.Н. Шайков // Телекоммуникации. 2016. № 9. С. 41-44.
11. Моделирование процесса функционирования автоматизированной системы в условиях программно-аппаратных воздействий с использованием математического аппарата нечетких сетей Петри / И.Д. Королев, О.В. Петрова, А.Б. Исупов, В.А. Юрков // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы 12 междунар. конф. Воронеж: ВГУ, 2012.

Поступила 13.02.2019; принята к публикации 10.06.2019

Информация об авторах

Петрова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. 8-(988)-312-87-19, e-mail: odi16.na@gmail.com
Иванов Станислав Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. 8-(918)-942-07-50, e-mail: sta399@yandex.ru
Королев Игорь Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. +7 (918)-311-46-21, e-mail: pi_korolev@mail.ru
Белоножко Дмитрий Григорьевич – адъюнкт, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. +7 (914)-665-64-74, e-mail: staeer@rambler.ru

MATHEMATICAL MODEL OF THE EVALUATION OF THE PROBABILITY OF THE UNRELIABLE WORK OF THE PROCESSING SYSTEM OF INFORMATION OF THE MULTI-AGENT ROBOTIC COMPLEX IN UNCERTAINTY CONDITIONS

O.V. Petrova, S.V. Ivanov, I.D. Korolev, D.G. Belonozhko

Shtemenko Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, Russia

Abstract: a feature of the functioning of autonomous mobile robots, including unmanned aerial vehicles (UAV) is a high level of uncertainty, which is caused by the unpredictability of the environment, the high dimension of the state space, the lack of accurate mathematical models, the hierarchy of management decisions. The article deals with the problem of searching the probabilistic characteristics of finding a multi-agent robotic complex in specific States of operation in the mode of information exchange. The relevance of this problem lies in the fact that one robot cannot perform a large number of diverse tasks, which is characterized by a large flow of information transmitted through the control channels. In this regard, there is a need to ensure sufficient bandwidth management channel group of agents. Implementation of multi-agent robotic complex of diverse tasks is possible only with the use of multi-channel information transmission system. The paper presents an analysis of the principles of multi-channel information transmission system in the control channel. The analysis showed that to solve the problem of information transfer both within the complex between agents and with the external environment, it is advisable to use a multi-channel information transfer system with different channel capacity, while the main channel and spare ones should be determined, which are connected to the work if the main channel cannot process all incoming applications with a probability of 0.95. The purpose of this work is to assess the probability of failure-free operation of the information processing system of a multi-agent robotic complex in the mode of information transmission in the event of a heavy load on the control channel with a special specification. To achieve this goal, a multi-channel Queuing system (QS) with different channel capacity is considered as a multi-channel information transmission system

Key words: large information flow, robotic complex, unmanned aerial vehicle, multi-channel information processing system, queuing system, cyberphysical systems

References

1. Baranov V.V., Gudkov M.A., Kribel` A.M., Lauta O.S., Nechepurenko A.P. "Protection of the control channel of robotic systems", *Proc. of Int. Scientific-Practical Conf.: Actual Problems of Ensuring Information Security (Aktual'nye problemy obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti. Trudy Mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii)*, 2017, pp. 32-37.
2. Kalyaev I.A., Gayduk A.R., Kapustyan S.G. "Models and algorithms of collective control in groups of robots" ("Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov"), Moscow, Fizmatlit, 2009, 280 p.
3. Ivanov D.A., Kotsynyak M.A., Lauta O.S., Nechepurenko A.P. "Model of distribution of factors of information influence on elements of information and telecommunication network", *Actual Problems of Information Telecommunications in Science and Education (Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii: sb. nauch. st.)*, 2017, pp 420-425.
4. Morzhov S.V., Khoroshko V.A., Benaser Karim "", "Processing of information flows in multi-machine systems", *Problems of Control and Informatics (Problemy upravleniya i informatiki)*, 2000, no. 2, pp.116-120.
5. Matveev V.F., Ushakov V.G. "Queuing systems" ("Sistemy massovogo obsluzhivaniya"), Moscow, MSU, 1984.
6. Venttsel' E.S. "Probability theory" ("Teoriya veroyatnostey"), 2010, pp. 596-628.
7. Kotsenyak M.A., Kuleshov I.A., Lauta O.S. "Stability of information and telecommunication networks" ("Ustoychivost' informatsionno-telekommunikatsionnykh setey"), St. Petersburg, Polytechnic University, 2013, 92 p.
8. Korolev I.D., Petrova O.V. "Development of a model for protecting information processed in computer networks from computer attacks", *News of Higher Institutions. North Caucasus region. Technical Science (Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki)*, 2006, app. 1, pp. 68-73.
9. Korolev I.D., Petrova O.V., Surayev A.S. "Development of a model for the protection of information processed in computer networks from computer attacks", *Collected Papers (Sbornik trudov)*, Krasnodar FVAS, 2011, pp. 34-40.
10. Korolev I.D., Petrova O.V., Malyshev D.V., Pugin K.V., Shaykov I.N. "Model of security of a complex of special-purpose automation equipment", *Telecommunications (Telekommunikatsii)*, 2016, no. 9, pp. 41-44.
11. Korolev I.D., Petrova O.V., Isupov A.B., Yurkov V.A. "Modeling the process of functioning of an automated system in terms of software and hardware effects using the mathematical apparatus of fuzzy Petri nets", *Proc. of 12th Int. conf.: Informatics: Problems, Methodology, Technologies (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii: materialy 12 mezhdunarodnoy konferentsii)*, Voronezh, VSU, 2012.

Submitted 13.02.2019; revised 10.06.2019

Information about the authors

Ol'ga V. Petrova, Cand. Sc. (Technical), Assistant professor, S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military School (4 Krasina str., Krasnodar 350063, Russia), tel. 8-(988)-312-87-19, e-mail: odi16.na@gmail.com.

Stanislav V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military School (4 Krasina str., Krasnodar 350063, Russia), tel. 8-(918)-942-07-50, e-mail: sta399@yandex.ru.

Igor' D. Korolev, Dr. Sc. (Technical), Professor, S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military School (4 Krasina str., Krasnodar 350063, Russia), tel. +7(918)-311-46-21, e-mail: pi_korolev@mail.ru

Dmitriy G. Belonozhko, Graduate student, S.M. Shtemenko Krasnodar Higher Military School (4 Krasina str., Krasnodar 350063, Russia), tel. +7(914)-665-64-74, e-mail: staer@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ MATLAB+SIMULINK

А.М. Литвиненко¹, Л.Б. Афанасьевский², А.Н. Горин², М.А. Чурсин³

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

³Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Воронежский филиал, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен подход к прямому определению параметров управляющих устройств, обеспечивающих минимальные значения обобщенных показателей переходных процессов в каскадных системах управления и в системах управления с импульсом по производной из промежуточной точки объекта. Модели систем управления созданы в среде Simulink. Объекты в моделях задаются передаточными функциями и моделями в пространстве состояний. Модели в пространстве состояний формируются с помощью представления дифференциальных уравнений высоких порядков, описывающих поведение объектов, в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка, записываемых в форме Коши. Даны фрагменты документа Mathcad для вычисления элементов матриц модели в пространстве состояний. Переходный процесс формируется как результат интегрирования с переменным шагом системы дифференциальных уравнений модели системы управления. Для каждого сеанса моделирования, задаваемого одной точкой из пространства значений входных параметров модели, в программе Matlab определяется количество точек переходного процесса для вычисления значения обобщенного показателя. Приведены фрагменты программного кода для построения планов экспериментов на моделях систем управления, реализующих случайный поиск, вычисления обобщенных показателей переходных процессов в Matlab и определения параметров управляющих устройств, обеспечивающих минимальные значения обобщенных показателей. Представлены графики оптимальных переходных процессов в каскадной системе управления и системе с импульсом по производной из промежуточной точки объекта

Ключевые слова: системы управления, переходный процесс, модель системы управления, Matlab, Simulink

Введение

Анализ подходов [1-5], используемых при проектировании систем управления, показывает, что в алгоритмы определения параметров управляющих устройств включаются в том или ином виде требования к качеству переходных процессов в системе. Заключительным этапом проектирования является проверка результатов проектирования путем построения переходных процессов и оценки их характеристик при типовых задающих и возмущающих воздействиях.

Следует отметить, что при решении указанных задач широко используется вычислительная система Matlab [3-5], при этом используются как формализация традиционных графоаналитических методов расчета, так и применение современных многокритериальных методов оптимизации [3, 4].

Для построения моделей различных технических объектов и систем управления используется система блочного моделирования Simulink, интегрированная в Matlab [6], при этом использование моделей Simulink ограничивается исследованием поведения систем при заданных или варьируемых параметрах. В [7] предложен подход к совместному использованию моделей систем управления в Simulink и программ Matlab обработки процессов в моделях. Суть подхода заключается в формировании переходных процессов в модели системы управления в Simulink и определении их обобщенных характеристик в Matlab. При реализации модели в качестве результата получается одна точка в пространстве параметров управляющего устройства. Оптимальные значения параметров управляющего устройства определяются путем построения и реализации плана вычислительных экспериментов на модели в области определения параметров и выбора параметров, обеспечивающих минимум обобщенных показателей переходного процесса.

Постановка задачи

Разработать метод, обеспечивающий эффективное применение прямого подхода для определения параметров управляющих устройств в сложных системах управления.

Методы исследования

В качестве примеров сложных систем управления рассматриваются каскадная система с двумя ПИ-регуляторами и система с импульсом по производной сигнала из промежуточной точки объекта, широко применяемые в промышленности. В качестве источника сигнала по производной используется реальное дифференцирующее звено с передаточной функцией

$$W_d(s) = \frac{k_d T_d}{T_d s + 1}$$

Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_o(s) = \frac{3}{7,5s + 1} \cdot \frac{1}{12,5s + 1} \cdot \frac{1}{25s + 1}. \quad (1)$$

Процесс построения модели в среде Simulink состоит из достаточно простых операций включения в модель требуемых блоков из соответствующих библиотек, задания их параметров и создания связей между блоками, при этом, при необходимости, можно сформировать подсистемы для совокупностей блоков, реализующих логически законченные функции. Для обеспечения связи Matlab с моделью Simulink изменяемые параметры модели следует задавать с помощью имен, а не числовых значений.

Структурная схема модели каскадной системы управления с двумя ПИ-регуляторами приведена на рис. 1. Модели регуляторов оформлены в виде подсистем Subsystem и Subsystem1.

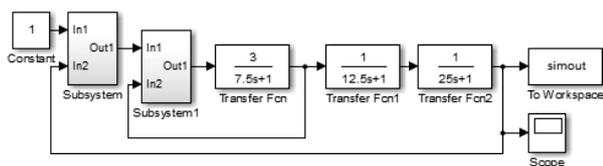


Рис. 1. Структурная схема модели каскадной системы с двумя ПИ-регуляторами в Simulink

Структурная схема модели подсистемы Subsystem1 приведена на рис. 2. Параметры регулятора заданы именами krr и krr1.

Структурная схема модели подсистемы Subsystem имеет такой же вид, как и на рис. 2, но параметры регулятора заданы именами kr и kr1.

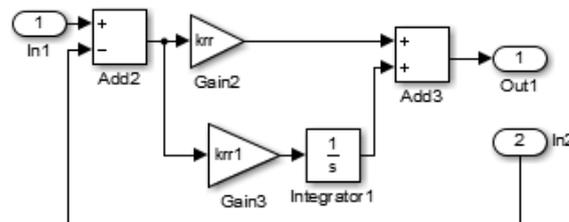


Рис. 2. Модель ПИ-регулятора, оформленная в виде подсистемы

Следует заметить, что обращение из Matlab к параметрам регуляторов осуществляется по именам без указания имен подсистем.

В представленных моделях использованы элементы из нескольких библиотек системы: Sources (Constant – источник постоянного сигнала), Sinks (Scope – осциллограф), Continuous (Integrator – интегратор, Transfer Fcn – передаточная функция), Math Operations (Add – сумматор, Gain – усилитель).

Элемент To Workspace из библиотеки Sinks служит для передачи в рабочее пространство Matlab данных о переходном процессе в системе (значений времени и выходной переменной системы на каждом шаге интегрирования).

Элемент Constant служит источником единичного ступенчатого воздействия по заданию регулятора.

Структурная схема модели системы с импульсом по производной сигнала из промежуточной точки объекта приведена на рис. 3.

На рис. 3 модель объекта представляет собой две модели в пространстве состояний, определяемые двумя элементами State-Space из библиотеки Continuous. Модели в пространстве состояний использованы только для иллюстрации возможностей моделирования в Simulink.

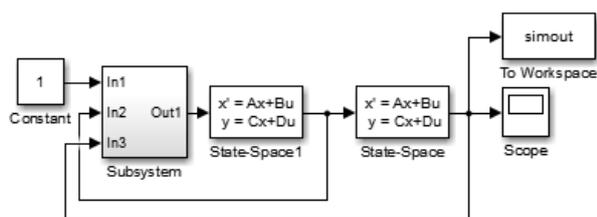


Рис. 3. Структурная схема модели двухконтурной системы с импульсом по производной из промежуточной точки

В состав подсистемы Subsystem включен как ПИ-регулятор, так и дифференциатор в виде реального дифференцирующего звена (рис. 4).

Для линейных систем модели в виде передаточной функции и дифференциального уравнения легко преобразуются друг в друга. Для получения модели в пространстве состояний удобнее использовать дифференциальное уравнение.

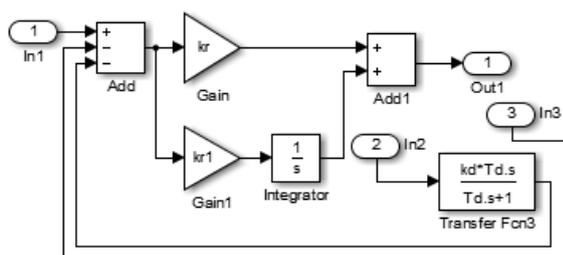


Рис. 4. Модель управляющей части системы с дифференциатором, оформленная в виде подсистемы

Пусть модель динамической системы имеет вид

$$\sum_{i=0}^n g_i y^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^m f_i u^{(i)}(t), \quad n \geq m, \quad (2)$$

где обозначения $u(t)$ и $y(t)$ приняты соответственно для входной и выходной переменных (сигналов) системы.

Рассмотрим процедуру преобразования модели вида (2) в модель в пространстве состояний, которое для стационарной системы с одним входом-одним выходом имеет вид

$$dx(t)/dt = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (3)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (4)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ – n -мерный вектор состояний; $u(t)$ – входная (управляющая) переменная; D – коэффициент;

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T, \quad C = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T,$$

$$A = [a_{ij}] \quad i, j = 1, 2, \dots, n$$

Модель в пространстве состояний может быть сформирована разными способами. Один из таких способов получения математического описания в виде (3), (4) заключается в представлении дифференциального уравнения (2) в форме Коши

$$\frac{dx_1}{dt} = \left(- \sum_{i=0}^{n-1} g_{n-1-i} x_{i+1} + \beta_n u(t) \right) g_n^{-1}, \quad (5)$$

$$\frac{dx_j}{dt} = x_{j-1} + \beta_{n-j+1} u(t), \quad j = 2, 3, \dots, n,$$

где коэффициенты $\beta_i, i=0, 1, \dots, n$ вычисляются по следующим рекуррентным формулам

$$\beta_i = \begin{cases} 0, & i < n - m, \\ \frac{f_m}{g_n}, & i = n - m, \\ \left(f_{n-i} - \sum_{j=1}^{m-n+i} g_{i-j} \beta_{i-j} \right) g_n^{-1}, & n - m < i < n, \\ f_0 - \sum_{j=1}^m g_{n-j} \beta_{n-j}, & i = n. \end{cases}$$

Выходная переменная системы вычисляется по формуле

$$y = x_n + \beta_0 u. \quad (6)$$

С учетом (5), (6) можем записать для модели (3), (4) следующее:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{g_{n-1}}{g_n} & -\frac{g_{n-2}}{g_n} & -\frac{g_{n-3}}{g_n} & \dots & -\frac{g_1}{g_n} & -\frac{g_0}{g_n} \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} \beta_n \\ \beta_{n-1} \\ \dots \\ \beta_2 \\ \beta_1 \end{pmatrix}^T, \quad C = (0, 0, \dots, 0, 1), \quad D = \beta_0.$$

Для первого сомножителя в передаточной функции (1) $D = 0$, а матрица A , векторы B и C содержат по одному элементу

$$A = [-1/7, 5] = [-0, 1333];$$

$$B = [3/7, 5] = [0, 4]; \quad C = [1].$$

Для двух последних сомножителей в передаточной функции (1) процедура преобразования модели, реализованная в Mathcad, представлена на рис. 5-7.

```

m := 0   n := 2 - порядки производных в правой
              и левой частях дифференциального
              уравнения

Кoeffициенты дифференциального уравнения.
Первым записывается коэффициент при младшей
степени

f0 := 1   g := (1 37.5 312.5)^T
    
```

Рис. 5. Задание параметров дифференциального уравнения

Как уже отмечалось, при реализации модели системы управления в качестве результата получается одна точка в пространстве параметров управляющего устройства. Поэтому следующим этапом является построение плана вычислительных экспериментов на модели в области определения параметров на языке Matlab.

```

beta := for i=0..n
         a_i <- 0
         for i=0..n-1
             a_i <- 0 if i < n-m
             a_i <- f_{n-i} if i = n-m
             a_i <- [ f_{n-i} - sum_{j=1}^{m-n+i} (g_{i-j} * a_{n-j}) ] * (g_n)^{-1} if n-m < i < n
         a_n <- f_0 - sum_{j=1}^m (g_{n-j} * a_{n-j})
         a
         beta = ( 0
                  0
                  1 )
    
```

Рис. 6. Вычисление коэффициентов системы уравнений (5)

```

A := for i=0..n-1
      for j=0..n-1
          a_{i,j} <- 0
      for i=1..n
          a_{0,i-1} <- -g_{n-i} / g_n
      for i=1..n-1
          a_{i,i-1} <- 1
      a

B := b_0 <- beta_n / g_n
      for i=1..n-1
          b_i <- beta_{n-i}
      b

A = ( -0.12  -3.2 * 10^{-3}
       1      0 )
B = ( 3.2 * 10^{-3}
       0 )
C := for i=0..n-1
      a_i <- 0 if i != n-1
      a_i <- 1 otherwise
      a
C = ( 0
      1 )
D := beta_0 = 0
    
```

Рис. 7. Вычисление матриц модели в пространстве состояний

План экспериментов при прямом поиске параметров управляющих устройств сложных систем управления должен быть, с одной стороны, достаточно представительным, а с другой стороны – экономичным. Поэтому прямое сканирование большого количества параметров с некоторым шагом исключается в силу большого числа реализаций модели. Альтернативой детерминированному поиску может служить случайный поиск. В этом случае алгоритм поиска может быть следующим:

для каждого параметра задается интервал, в котором он может принять любое значение;

значения параметров формируются случайным образом в соответствии с равномерным законом распределения;

для каждого сформированного множества параметров запускается модель системы управления, вычисляется и запоминается какая-либо обобщенная характеристика переходного процесса;

процедура формирования значений параметров и вычисление характеристики переходного процесса многократно повторяется;

из множества реализаций переходного процесса выбирается та реализация, для которой обобщенная характеристика имеет минимальное значение.

Код программы на языке Matlab для каскадной системы управления имеет следующий вид:

```

N=1000; %Число испытаний модели системы управления
krm=5; krb=25; Tim=10; Tib=30; %Границы интервалов
%для параметров
krrm=2; krrb=10; Ti1m=2; Ti1b=5;
intmin=1e8;
for i=1:1:N,
    %Формирование и передача параметров в модель
    Simulink
    kr=random('unif',krm,krb); kr1=1/random('unif',Tim,Tib);
    krr=random('unif',krrm,krrb);
    krr1=1/random('unif',Ti1m,Ti1b);
    open('kaskad_subsystem.mdl');
    sim('kaskad_subsystem.mdl');
    d=size(tout); integral=0;
    for j=2:d(1),...
        %p1=(1-simout.Data(j))^2;%abs
        p1=abs(1-simout.Data(j))+abs(1-simout.Data(j-1));
        %p1=(1-simout.Data(j))^2+(1-simout.Data(j-1))^2;
        p2=simout.Time(j)-simout.Time(j-1);
        integral=integral+p1*p2;
        %integral=integral+p1;
    end;
    if (integral<intmin)
        intmin=integral; krz=kr; Ti1z=1/kr1; krrz=krr;
        Ti2z=1/krr1;ii=i;
    end;
end;
    
```

```
kr=krz; kr1=1/Ti1z; krr=krrz; krr1=1/Ti2z;
%Отображение переходного процесса и оптимальных
%значений параметров управляющих устройств
open('kaskad_subsystem.mdl');
sim('kaskad_subsystem.mdl');
intmin,krz,Ti1z,krrz,Ti2z,ii
```

В приведенном коде открытие модели в Simulink осуществляется функцией `open`, а запуск модели выполняется с помощью функции `sim`. Оператор цикла `for` обеспечивает многократный запуск модели и вычисление обобщенного показателя переходного процесса.

Генерирование случайных чисел для различных законов распределения в Matlab осуществляется с помощью функции `random`. Обращение к этой функции имеет вид

```
x = random('name', value1 [, value2, ...]),
```

где x – случайное число; *name* – название закона распределения, принятое в Matlab; *value1*, *value2* – значения параметров плотности вероятности.

Величину интервала интегрирования уравнений модели T_m в Simulink следует выбирать такой, чтобы получить достаточно полное представление о переходном процессе.

Результаты исследования

Для каждой реализации модели результатом моделирования является значение обобщенного показателя переходного процесса.

Переходный процесс формируется как результат интегрирования системы дифференциальных уравнений модели с переменным шагом, поэтому количество точек процесса для каждой точки из пространства значений входных параметров модели будет различным.

В рабочую область `Workspace` среды Matlab передается массив временных отсчетов `simout.Time` при интегрировании системы дифференциальных уравнений модели Simulink и массив значений выходной переменной (переходного процесса) `simout.Data`. Кроме того, массив временных отсчетов передается в переменной `tout`.

Фрагмент программного кода, осуществляющий поиск параметров, минимизирующих обобщенную характеристику переходного процесса при единичном значении возмущения по задающему воздействию, имеет следующий вид:

```
d=size(tout); integral=0;
for j=2:1:d(1),...
    %p1=(1-simout.Data(j))^2;%abs
```

```
p1=abs(1-simout.Data(j))+abs(1-simout.Data(j-1));
%p1=(1-simout.Data(j))^2+(1-simout.Data(j-1))^2;
p2=simout.Time(j)-simout.Time(j-1);
integral=integral+p1*p2;
%integral=integral+p1;
end;
if (integral<intmin)
intmin=integral; krz=kr; Ti1z=1/kr1; krrz=krr;
Ti2z=1/krr1; ii=i;
```

Функция `size` возвращает в векторе d размер массива по каждой размерности. В качестве результата работы кода возвращаются минимальное значение обобщенного показателя переходного процесса $intmin$, значения параметров управляющего устройства krz , $Ti1z$, $krrz$, $Ti2z$ и номер ii реализации модели:

```
intmin, krz, Ti1z, krrz, Ti2z, ii.
```

Начальное значение переменной `intmin` должно быть задано достаточно большим до процедуры случайного поиска.

При моделировании были рассмотрены четыре вида обобщенных показателей

$$I_1 = \sum_{i=2}^n |1 - y_i|, \quad I_2 = \sum_{i=2}^n (1 - y_i)^2,$$

$$I_3 = \sum_{i=2}^n (|1 - y_i| + |1 - y_{i-1}|)(t_i - t_{i-1}),$$

$$I_4 = \sum_{i=2}^n [(1 - y_i)^2 + (1 - y_{i-1})^2](t_i - t_{i-1}),$$

где y – выходная переменная объекта;

n – число точек в реализации переходного процесса;

t_i – время в i -й точке.

Два последних показателя с точностью до постоянного множителя представляют собой интегралы, вычисляемые по формуле численного интегрирования методом трапеций.

В качестве критерия оптимальности переходного процесса во всех случаях принимается минимум показателя.

Переходный процесс при оптимальных значениях всех показателей является колебательным. Различие заключается в величине динамической ошибки и времени затухания процесса. Показатель I_3 обеспечивает наилучший вариант общепринятых характеристик процесса.

График переходного процесса в каскадной системе управления при оптимальных по показателю I_3 параметрах управляющего устройства и единичном изменении задающего воздействия приведен на рис. 8.

График переходного процесса в системе управления с импульсом по производной при оптимальных по показателю I_3 параметрах управляющего устройства и единичном ступенчатом изменении задающего воздействия приведен на рис. 9.

Сравнивая графики переходных процессов на рис. 8 и рис. 9, можно сделать вывод, что они практически идентичны.

Для определения оптимальных параметров управляющего устройства при возмущении по нагрузке модель Simulink должна быть изменена (рис. 10), а задающее воздействие следует установить нулевым.

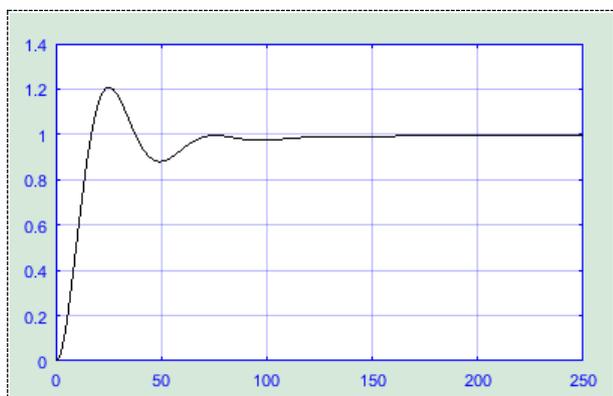


Рис. 8. Переходный процесс в каскадной системе при изменении задания регулятора

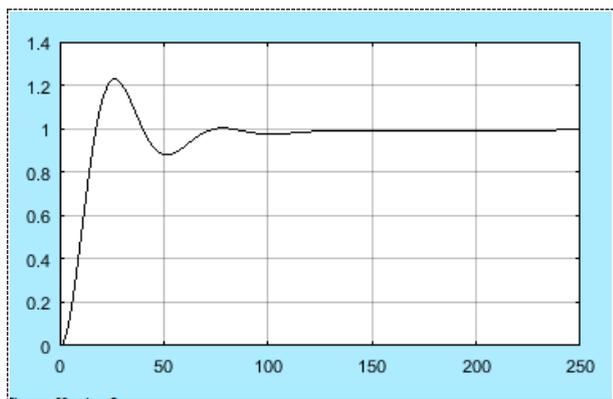


Рис. 9. Переходный процесс в системе с дифференциатором при единичном ступенчатом изменении задающего воздействия

График переходного процесса в каскадной системе управления при оптимальных по показателю I_3 параметрах управляющего устройства и единичном ступенчатом воздействии по нагрузке приведен на рис. 11.

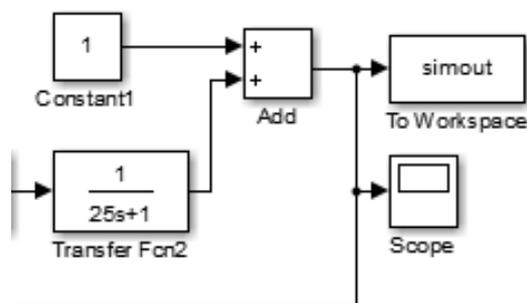


Рис. 10. Фрагмент модели системы управления с единичным возмущением по нагрузке



Рис. 11. Переходный процесс в каскадной системе при единичном возмущении по нагрузке

Следует заметить, что оптимальные значения параметров при воздействии по заданию и нагрузке отличаются незначительно.

Заключение

Предложен эффективный метод определения оптимальных параметров управляющих устройств в сложных системах управления, оперирующий непосредственно с переходным процессом в системе и использующий процедуру случайного поиска.

Предложенная организация взаимодействия Matlab и Simulink может быть применена при моделировании как непрерывных, так и дискретных систем.

Литература

1. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 416 с.
2. Жмудь В.А. Автоматизированное проектирование систем управления. Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2012. 100 с.
3. Джафари Х.С.М., Северин И. П. Многокритериальный параметрический синтез систем автоматического управления минимизацией интегральных квадратичных

оценок в среде Matlab // Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab: сб. тр. IV всерос. науч. конф. Астрахань: Издательский дом «Астраханский ун-т», 2009. С. 444-456.

4. Веремей Е.И. Реализация оптимизационного подхода к проектированию систем управления в среде Matlab // Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab: сб. тр. V междунар. науч. конф. Электрон. дан. Харьков: НТУ ХПИ, 2011. С. 19-39.

5. Косовская О.В., Северин В.П. Параметрический синтез регуляторов системы управления паровой турбиной АЭС методами векторной оптимизации в среде Matlab

// Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab: сб. тр. V междунар. науч. конф. Электрон. дан. Харьков: НТУ ХПИ, 2011. С. 283-294.

6. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Век, 2008. 367 с.

7. Применение имитационного моделирования в среде Matlab+Simulink для параметрического синтеза систем управления / А.М. Литвиненко, Л.Б. Афанасьевский, А.Н. Горин, М.А. Чурсин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 23-27.

Поступила 17.04.2019; принята к публикации 10.06.2019

Информация об авторах

Литвиненко Александр Михайлович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-473-235-33-56, e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru

Афанасьевский Леонид Борисович - канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-906-675-78-87, e-mail: aflionid@yandex.ru

Горин Александр Николаевич - канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8-915-543-23-77, e-mail: algorin.algoral@mail.ru

Чурсин Михаил Александрович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова (394030, г. Воронеж, ул. Карла Маркса, д. 67а), тел. 8-910-746-03-10, e-mail: chur1951@yandex.ru

DETERMINATION OF PARAMETERS OF CONTROL DEVICES IN COMPLEX CONTROL SYSTEMS USING COMPUTER SIMULATION IN MATLAB + SIMULINK ENVIRONMENT

A.M. Litvinenko¹, L.B. Afanas'evskiy², A.N. Gorin², M.A. Chursin³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy", Voronezh, Russia

³G.V. Plekhanov Russian University of Economics, Voronezh branch, Voronezh, Russian Federation

Abstract: an approach to direct determination of parameters of control devices that provide the minimum values of generalized transient indicators in cascade control systems and control systems with a pulse by the derivative from the intermediate point of the object is considered. Models of control systems are created in the Simulink environment. Objects in models are defined by transfer functions and models in the state space. Models in the state space are formed using the representation of high-order differential equations describing the behavior of objects in the form of a system of first-order differential equations written in the Cauchy form. Fragments of the Mathcad document are given to calculate the elements of the model matrices in the state space. The transition process is formed as a result of integration with a variable pitch of the system of differential equations of the control system model. For each simulation session defined by a single point from the space of values of the input parameters of the model, the number of transition points for calculating the value of the generalized indicator is determined in the Matlab program. The program code fragments for constructing plans for experiments on models of control systems that implement random search, calculating generalized indicators of transient processes in Matlab and determining parameters of control devices that provide minimum values of generalized indicators are presented. Optimal transient graphs are presented in a cascade control system and a system with a pulse by the derivative of the intermediate point of the object

Key words: control systems, transient process, control system model, MatLab, Simulink

References

1. Gostev V.I. "Design of fuzzy controllers for automatic control systems" ("Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya"), St. Petersburg, BHV-Peterburg, 2011, 416 p.

2. Zhmud' V.A. "Automated aided design of control systems" ("Avtomatizirovannoe proektirovanie sistem upravleniya"), Novosibirsk, Publishing House of the Novosibirsk State Technical University, 2012, 100 p.
3. Jafari H.S.M., Severin V.P. "Multicriteria Parametric synthesis of automatic control systems for minimization of integral quadratic estimates in Matlab", *Proc. of the IV All-Russian Scientific Conference: Design of Engineering and Scientific Applications in the Matlab Environment*, Astrakhan, Publishing house "Astrakhan University", 2009, pp. 444-456.
4. Veremey E.I. "Implementation of the optimization approach to the design of control systems in Matlab", *Proc. of the V International Scientific Conference: Design of Engineering and Scientific Applications in the Matlab Environment*, Kharkov, National Technical University Kharkov Polytechnic Institute, 2011, pp. 19-39.
5. Kosovskaya O.V., Severin V.P. "Parametric synthesis of controllers of a steam turbine a nuclear power plant by the methods of vector optimization in Matlab", *Proc. of the V International Scientific Conference: Design of Engineering and Scientific Applications in the Matlab Environment*, Kharkov, National Technical University Kharkov Polytechnic Institute, 2011, pp. 283-294.
6. German-Galkin S.G. "Matlab & Simulink. Design of mechatronic systems on PC" ("Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK"), St. Petersburg: Korona-Vek, 2008, 367 p.
7. Litvinenko A.M., Afanasyevskiy L.B., Gorin A.N., Chursin M.A. "Application of simulation modeling in Matlab + Simulink for parametric synthesis of control systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 23-27.

Submitted 17.04.2019; revised 10.06.2019

Information about the authors

Aleksandr M. Litvinenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel.: 8-473-235-33-56, e-mail: litvinenko@eauts.vorstu.ru

Leonid B. Afanas'evskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 "A" Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: 8-906-675-78-87, e-mail: afleonid@yandex.ru

Aleksandr N. Gorin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 "A" Starykh Bol'shevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: 8-910-536-14-48, e-mail: algorin.algoral@mail.ru

Mikhail A. Chursin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh branch of the G.V. Plekhanov Russian University of Economics (67a Karl Marx str., Voronezh 394030, Russia), tel.: 8-910-746-03-10, e-mail: chur1951@yandex.ru

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ NX OPEN**А.М. Нужный¹, М.В. Веркошанский¹, Н.И. Гребенникова¹, С.Л. Кенин²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²ООО «Атос Айти Солюшенс Энд Сервисез», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается вопрос создания пользовательского инструментария для системы автоматизированного проектирования Siemens NX, предназначенного для параметризации твердотельных моделей, представленных в виде сборки. Приведен перечень прикладных программных интерфейсов, предоставляемых системой Siemens NX и предназначенных для разработки пользовательских программных модулей, интегрируемых в систему. Рассмотрены назначение, архитектура, состав и функциональные возможности таких инструментов, как NX OPEN и Journaling. Выбор этих средств определен тем фактом, что они предоставляют наиболее эффективные инструменты для разработки пользовательских приложений, ориентированных на манипулирование твердотельными моделями. Актуальность разработки редактора твердотельных моделей определяется тем, что он является одним из составных элементов разрабатываемой системы параметрического моделирования, позволяющей значительно повысить эффективность создания параметрических описаний существующих твердотельных моделей. При разработке функционала приложения выполнены следующие требования: реализована возможность изменения практически всех параметров твердого тела; осуществляется проведение анализа ребер и граней твердого тела; предусмотрено сохранение набора параметров существующего твердого тела для последующего применения к другим твердотельным объектам. Приведено описание принципов работы созданного программного продукта, рассмотрена его архитектура и описаны классы и интерфейсы объектной модели Open NX, используемые в приложении

Ключевые слова: параметрическое моделирование, NX API, редактор твердых тел

Введение

В сегодняшней бурной экономике и глобальном рынке существует высокая конкуренция за выпуск нового, лучшего и более дешевого продукта. Производители сталкиваются с растущими требованиями клиентов. Они должны постоянно совершенствовать методы создания продуктов, модернизировать организационную структуру производства для того, чтобы сделать независимыми все этапы разработки – от исследования и дизайна и до выпуска и поддержки продукта.

Для содействия инновациям в дизайне в рамках цикла разработки продукта полагаются на компьютерные инструменты, в частности CAD/CAE-системы. Подход с использованием систем автоматизированного проектирования заменяет исторические проблемы «сборка-тестирование-перепроектирование» благодаря компьютерному моделированию проектов и анализа их характеристик на ранних этапах разработки.

Но даже при высокой автоматизации в CAD/CAE-системах инженеры сталкиваются со специфическими задачами, требующими инди-

видуального подхода, поэтому почти во всех САПР присутствует механизм, с помощью которого можно разрабатывать собственные встраиваемые в систему прикладные программные модули.

В данной статье рассмотрен пример использования инструментария NX Open для расширения функционала системы автоматизированного проектирования Siemens NX.

Описание разработанного приложения

Разработанная утилита «Редактор твердых тел» является своего рода заменой стандартных средств редактирования объектов в NX, но имеет полезный для пользователя дополнительный функционал, который описан далее.

Принцип работы

Принцип работы приложения заключается в том, что для начала работы пользователь выбирает объект, редактирование параметров которого будет производиться. На этом этапе приложение обращается к NX Open API.

Следующий этап – работа с объектом. Пользователю предоставляется возможность изменить параметры, характеристики и атрибу-

ты выбранного объекта. Все действия производятся на уровне приложения.

Для сохранения внесенных изменений приложение вновь обращается к NX Open API. После применения изменений объект редактирования моментально перерисовывается в окне NX.

Архитектура

Архитектура приложения представлена на рис. 1. Приложение состоит из трех выделяемых слоев.

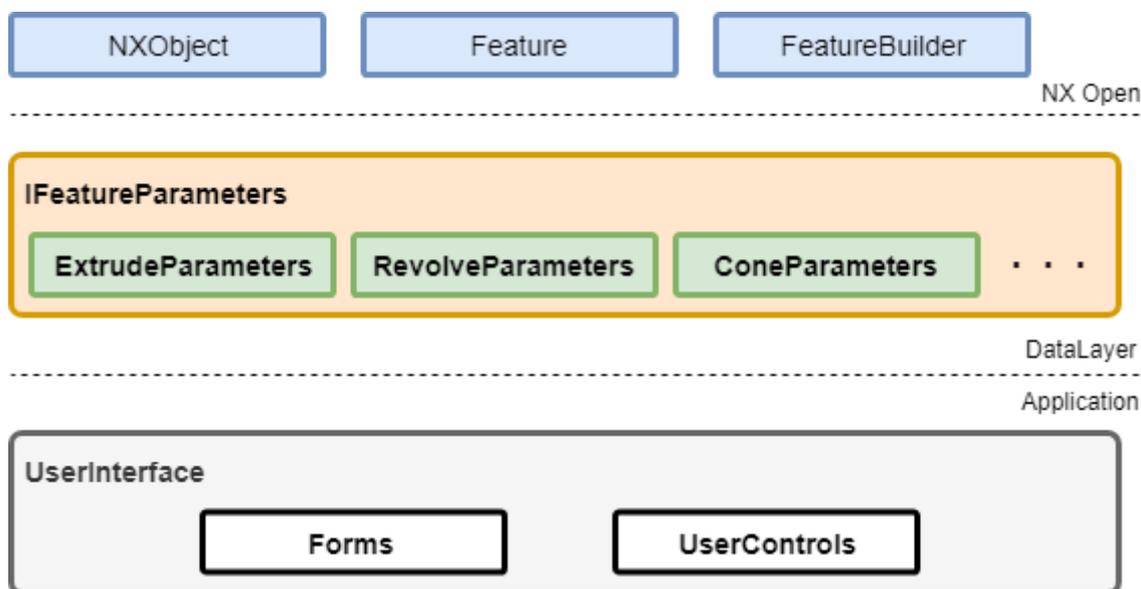


Рис. 1. Упрощенная архитектура приложения

Первый слой – NX Open – служит для получения экземпляра редактируемого объекта или тела, а также для применения изменений, внесенных пользователем. Экземпляр объекта невозможно получить без обращения к NX Open API. Существует несколько способов получения объекта:

1. Посредством вызова специального метода. В этом случае управление NX переходит к пользователю, а приложение ожидает, пока пользователь не выберет объект вручную. Метод возвращает экземпляр выбранного пользователем объекта, который получает приложение.

2. Получить коллекцию объектов текущей сессии NX. Такая коллекция содержит все типы объектов. Для выбора нужного объекта коллекцию можно отфильтровать по различным параметрам. Также получить объект из коллекции можно, зная его имя в идентификаторе журнала NX.

Второй слой – DataLayer. Этот слой является промежуточным и содержит основную логику приложения.

Интерфейс `IFeatureParameters` определяет набор специальных методов и свойств:

- информация о типе объекта;
- информация об идентификаторе в журнале NX;
- анализ выбранного пользователем объекта;
- применение изменений, внесенных пользователем;
- и др.

Классы `Parameters`, реализующие интерфейс `IFeatureParameters`, содержат информацию о соответствующих объектах. Так, например, класс `ExtrudeParameters` (инструмент «Выдавливание» в NX) может содержать следующие свойства:

- строку, содержащую тип объекта `Extrude`;
- строку, содержащую идентификатор объекта в журнале NX;
- набор свойств, отвечающих за параметры и ограничения выдавливания;
- угол уклона выдавливания и др.

Классы `Parameters` также содержат механизм частичного сохранения параметров объекта (полное сохранение объекта возможно только в виде модели). Благодаря этому пользователь освобождается от часто повторяемых изменений

над объектом. Механизм позволяет повторно применять изменения к объектам одного типа.

Слой *DataLayer* спроектирован таким образом, что никак не взаимодействует напрямую ни с *NX Open API*, ни с интерфейсом приложения. Благодаря такой архитектуре достигается возможность добавления поддержки работы с любыми объектами без перепроектирования пользовательского интерфейса.

Третий слой – *Application*. Данный слой представляет собой интерфейс пользователя. Элементы управления окна приложения динамически формируются в зависимости от объекта, с которым работает пользователь. Этому способствуют пользовательские элементы управления (*User Controls*). *User Controls* скрывают в себе связь интерфейса с классами, реализующими интерфейс *IFeatureParameters*.

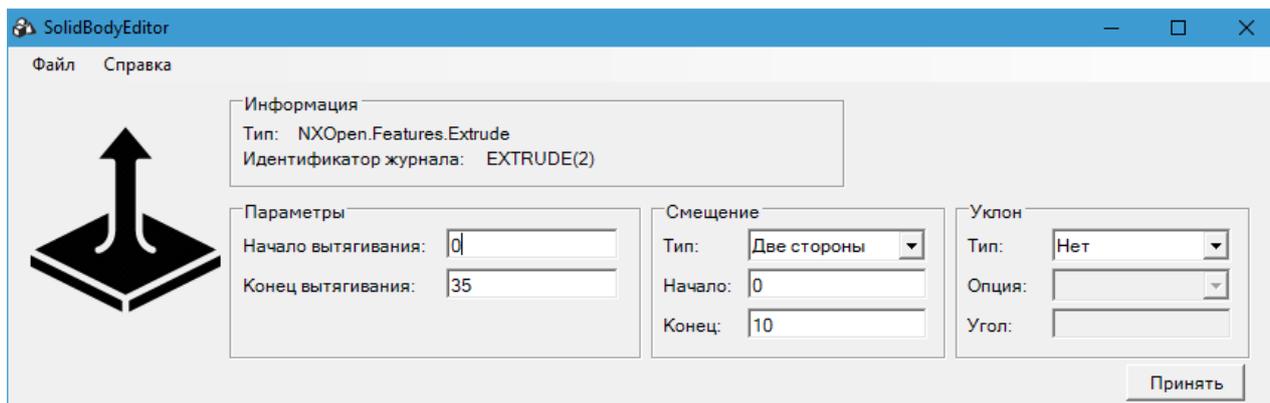


Рис. 2. Пример интерфейса приложения

Применение

Хотя приложение «Редактор твердых тел» разработано как часть набора программных средств по параметризации моделей в *Siemens NX*, на данном этапе оно уже выполняет свои функции в полном объеме.

Приложение позволяет менять практически все параметры твердого тела, доступные пользователю. Проводит анализ ребер и граней, составляющих твердое тело. В последующем эта информация будет использована для по-

строения параметрической модели. Также в приложении реализован механизм пользовательских настроек, позволяющий сохранять набор параметров существующего твердого тела и применять его к другим.

Интерфейс приложения генерируется динамически в зависимости от типа тела, с которым идет работа. Пример интерфейса приложения по работе с твердым телом типа «Вытягивание» (англ. *Extrude*) представлен на рис. 2.

Демонстрация работы приложения с моделью корпуса насоса представлена на рис. 3.

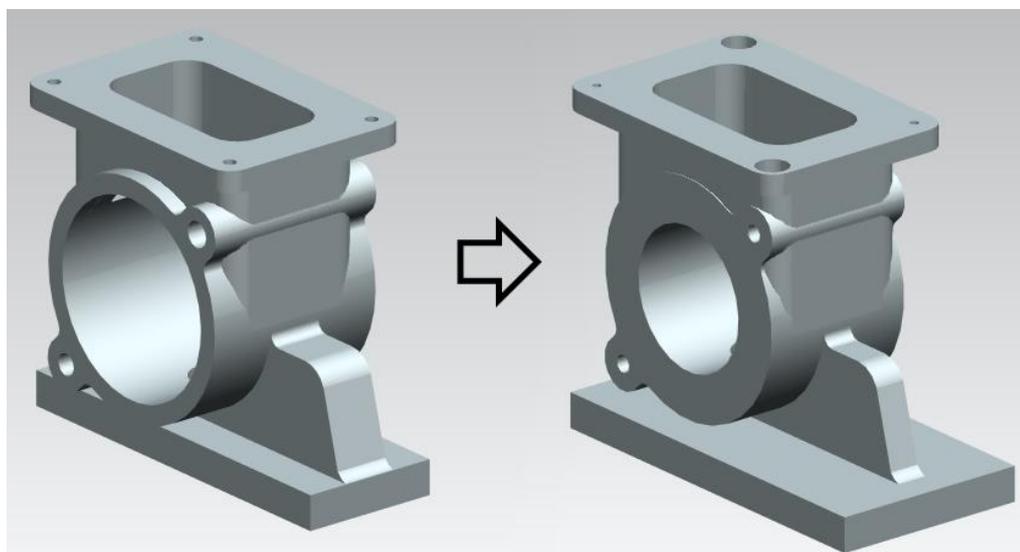


Рис. 3. Изменение модели

Заключение

В статье выполнено рассмотрение компонентов NX Open – набора API-интерфейсов, обеспечивающих гибкую интеграцию пользовательских приложений с Siemens NX с использованием различных языков программирования. Проведен обзор вспомогательных средств, таких как Block Styler и инструмент «Журнал». Также была рассмотрена общая архитектура NX Open.

С помощью рассмотренных средств на языке программирования C# было разработано приложение «Редактор твердых тел». Архитек-

тура приложения предусматривает добавление поддержки новых объектов без серьезных изменений в коде. Разработанное приложение является частью разрабатываемого авторами набора программных средств для параметризации моделей в Siemens NX.

Литература

1. МакГрат Майк. Программирование на Python для начинающих/ пер. с англ. М.А. Райтман. М.: Эксмо, 2015. 192 с.
2. Герберт Шилдт. Библиотека SWING для Java: руководство для начинающих. М.: Вильямс, 2007. 704 с.

Поступила 04.04.2019; принята к публикации 23.05.2019

Информация об авторах

Нужный Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nam14@mail.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Веркошанский Максим Валерьевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: mv_vgtu@mail.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Гребеникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: g-naty@yandex.ru, тел. (473) 2-46-77-18

Кенин Сергей Леонидович – канд. техн. наук, руководитель проектов, филиал в г. Воронеж ООО "Атос АйТи Солюшенс Энд Сервисез" (394026, Россия, г. Воронеж, проспект Труда, 65), e-mail: sergey.kenin@atos.net, тел. (473) 239-90-20

PARAMETRIZATION OF SOLID MODELS USING NX OPEN

A.M. Nuzhnyy¹, M.V. Verkoshanskiy¹, N.I. Grebennikova¹, S.L. Kenin²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²ATOS IT Solutions and Services, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the issue of creating custom tools for the Siemens NX automated design system, designed to parameterize solid-state models presented in the form of an assembly. A list of application programming interfaces provided by the Siemens NX system and designed to develop custom software modules that are integrated into the system is provided. The purpose, architecture, composition, and functionality of tools such as NX OPEN and Journaling are considered. The choice of these tools is determined by the fact that they provide the most effective tools for developing user applications that focus on manipulating solid state models. The relevance of developing an editor for solid-state models is determined by the fact that it is one of the constituent elements of the parametric modeling system under development, which makes it possible to significantly increase the efficiency of creating parametric descriptions of existing solid-state models. The article describes the principles of the developed software, its architecture and describes the classes and interfaces of the Open NX object model used in the application

Key words: parametric modeling, NX API, solids editor

References

1. McGrath M. "Python in easy steps", Moscow, Eksmo, 2013, 192 p.
2. Schildt H. "Swing: a beginner's guide", Moscow, Williams, 2007, 704 p.

Submitted 04.04.2019; revised 23.05.2019

Information about the authors

Aleksandr M. Nuzhnyy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: nam14@mail.ru

Maksim V. Verkoshanskiy, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: mv_vgtu@mail.ru

Nataliya I. Grebennikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

Sergey L. Kenin, Cand. Sci. (Technical), ATOS (65 prospekt Truda, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergey.kenin@atos.net

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ
С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ТИПА V_f** **В.А. Мустафаев, М.Н. Салманова****Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика**

Аннотация: рассмотрено моделирование сложных параллельных и распределенных систем, описывающих функционирование динамических объектов в условиях неопределенности. Предложен подход для моделирования сложных распределенных параллельных систем, который базируется на математическом аппарате нечетких сетей Петри типа V_f (НСПВ $_f$), представляющих собой расширение обычных сетей Петри с неопределенностью маркировки позиций. Определены правило срабатывания переходов и динамика изменения начальной и последующих маркировок НСПВ $_f$. Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов НСПВ $_f$. Предлагаемый алгоритм обеспечивает эффективное преобразование вещных данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования, решение задачи разрешимости срабатывания переходов, находящихся в состояниях конфликта, автоматическое выявление тупиковых ситуаций, а также упрощает и ускоряет процесс моделирования. На примере модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств показано, что в результате полученная последовательность срабатывания переходов полностью описывает процесс функционирования НСПВ $_f$. На основе компьютерного эксперимента получена диаграмма достижимости в виде последовательности матриц

Ключевые слова: модель, алгоритм, нечеткие сети Петри, матрица инцидентности, модуль обработки

Введение

Сети Петри (СП) и их различные расширения являются эффективным моделирующим математическим аппаратом, достоинством которых является возможность представления структуры и анализа динамики состояний сложных распределенных параллельных систем. Достоинствами различных подклассов СП являются простота, наглядность и наличие хорошо развитых аналитических возможностей. Конструкции СП представляют собой сетевую модель для описания и анализа динамики функционирования систем в виде «события-действие, причина-следствие».

Основное преимущество СП и их расширения для моделирования динамических взаимодействующих процессов заключается в том, что предметная область моделируется СП и в результате анализа структуры моделей в независимости от реального объекта, в «online»¹ режиме осуществляется оценка целесообразности предлагаемого проектного решения компьютерными экспериментами.

Одной из важнейших областей применения СП являются моделирование и управление дискретных объектов. Здесь аппарат СП используется на стадии проектирования системы управления и при создании алгоритмической основы управления объекта.

СП имеют возможность [1] отображать параллелизм, асинхронность и иерархичность моделируемых систем. При проектировании и управлении систем СП применяется как вспомогательный инструмент анализа. При этом используются общепринятые методы проектирования систем, и в результате анализа основных свойств сети осуществляется оценка целесообразности проекта. Процесс проектирования носит итерационный характер, в случае отрицательного результата модифицированный проект снова моделируется СП и анализируется до тех пор, пока не достигаются желаемые результаты. Преимущество данного подхода заключается в том, что его можно использовать и для анализа существующих систем. К недостаткам выразительных возможностей подклассов СП относятся их непригодность моделирования событий с приоритетами и отсутствие возможности представления структуры и динамики функционирования систем в условиях неопределенности.

Различные обобщения СП [2] являются мощным аппаратом моделирования синхронных, асинхронных, параллельных распределенных и недетерминированных динамических взаимодействующих процессов.

Существующие проблемно-ориентированные расширения СП используются для описания неопределенности срабатывания переходов, находящихся в состоянии конфликта. При этом каждому элементу множества разрешенных последовательностей переходов

приписывается некоторая вероятность. Вторым вариантом описывает неопределенность наличия маркеров в позициях сети. Множество позиций СП моделирует состояние отдельных элементов системы, количество маркеров во всех позициях, определяет глобальное состояние моделируемого объекта. Неопределенность количества маркеров, находящихся в входных и выходных позициях СП, задается функциями распределения вероятности и степени принадлежности. В связи с этим, в представленной работе рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких СП с неопределенностью маркировки позиций. Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов нечетких СП типа V_f .

Правила срабатывания переходов и алгоритм функционирования нечетких сетей Петри типа V_f

Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде нечетких сетей Петри типа V_f (НСПВ $_f$). НСПВ $_f$ определяется в виде $V_f = (P, T, I, O, M_0)$, где $P = \{p_i\}$, ($i = \overline{1, n}$) – нечеткое множество позиций; $T = \{t_k\}$, ($k = \overline{1, m}$) – нечеткое множество переходов; $I : P \times T \rightarrow N_0$; $O : T \times P \rightarrow N_0$ – соответственно входная и выходная функция инцидентности переходов; $N_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ множество натуральных чисел и ноль. M_0 – матрица начальной маркировки с размерностью $(n \times (d + 1))$. Каждый элемент μ_{ij}^0 начальной матрицы равен значению функции принадлежности наличия $(j - 1)$ числа маркеров в позиции p_i НСПВ $_f$ на момент начала ее запуска.

Размерность количества столбцов матрицы начальной маркировки определяется максимальным количеством маркеров d в позициях НСПВ $_f$: $J = \{1, \dots, d, d + 1\} \subset N_0$.

Функционирование и условие возбуждения разрешенных переходов, а также текущая маркировка НСПВ $_f$ определяются по нижеописанным правилам:

Правило 1. Начальная и текущая состояния НСПВ $_f$ определяется матрицей M с размерностью $(n \times (d + 1))$, компоненты которой удовлетворяют условию $\mu_{ij}^0 \in [0, 1] \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}), \forall j \in J$.

Правило 2. При некоторой текущей маркировке M , если удовлетворяется условие $\sigma \geq (I(p_1, t_k), I(p_2, t_k), \dots, I(p_1, t_k))$ то переход $t_k \in T$ НСПВ $_f$ считается возбужденным, где

$$\sigma_i = \max_{(j \in J) \wedge (m_{ij} > 0)} \{j - 1\} \quad (\forall p_i \in P).$$

Правило 3. После срабатывания возбужденного перехода $t_k \in T$ НСПВ $_f$ элементы новой маркировки изменяются по принципу:

– во входных позициях $p_i \in P$ НСПВ $_f$, для которых $I(p_i, t_k) \neq 0$, вычисляются по формулам:

$$\mu_{i1}^v = \max_{j \in \{1, 2, \dots, I(p_i, t_k) + 1\}} \{\mu_{ij}\}; \quad (1)$$

$$\mu_{ij}^v = \mu_{i, j+I(p_i, t_k)} \quad (\forall j \in J \setminus \{1\}) \quad (2)$$

– во выходных позициях $p_i \in P$, для которых $O(t_k, p_i) \neq 0$ вычисляются по формулам [3]:

$$\mu_{ij}^v = \min\{\mu_{ij}, 1 - q_k\} \quad (\forall j \in \{1, 2, \dots, O(t_k, p_i)\}) \quad (3)$$

$$\mu_{ij}^v = \max\{\min\{\mu_{ij}, 1 - q_k\}, \min\{\mu_{i, j-O(t_k, p_i)}, q_k\}\} \quad (\forall j \in J) \wedge O(t_k, p_i), \quad (4)$$

где

$$q_k = \min\{\max\{\mu_{ij}\} \quad (\forall t_k \in T)\}; \quad (i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (j > I(p_i, t_k))$$

(q_k – степень принадлежности нечеткого срабатывания перехода $t_k \in T$).

Если некоторые позиции являются одновременно входными и выходными позициями перехода $t_k \in T$, то элементы матрицы текущей маркировки M_v вычисляются вначале по формулам (1)–(2), а затем по формулам (3)–(4).

Учитывая вышеизложенное, разработан алгоритм [4, 5, 6] функционирования НСПВ $_f$.

Шаг 1. Формируется матрица входных инцидентий $D^- = [d_{ij}^-]$, ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$) с размерностью $(n \cdot m)$, где

$$d_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in I(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j). \end{cases}$$

Шаг 2. Формируется матрица выходных инцидентий $D^+ = [d_{ij}^+]$, ($j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$) с размерностью $(m \cdot n)$, где

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} l, & \text{если } p_i \in O(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin O(t_j). \end{cases}$$

и $l \in N_0$.

Шаг 3. Определяется число столбцов d матрицы начальной маркировки M_0 :

3.1. Полагают $max = d_{11}^-$;

3.2. Если выполняется условие $d_{ij}^- > max$, то присваивается $max = d_{ij}^-$, где $j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$;

3.3. Присваивается $d = max$.

Шаг 4. Создание матрицы начальной маркировки $M_0 = [\mu_{ij}]$, где $i = \overline{1, n}, j = \overline{1, d+1}$.

Шаг 5. Вычисление элементов вектора σ :

5.1. Полагают $i = 1$;

5.2. Полагают $r = 0$;

5.3. При выполнении условия $\mu_{ij} \neq 0$, полагают $r = j$, для всех $j = \overline{1, d+1}$;

5.4. Вычисляется $\sigma_i = r - 1$, и индекс i увеличивается на единицу: $i = i + 1$. В случае выполнения условия $i \leq n$, осуществляется переход к п. 5.2, иначе осуществляется переход к шагу 6.

Шаг 6. Для каждого перехода $t_j, j = \overline{1, m}$ проверяется условие срабатывания: если для всех входных позиций перехода t_j выполняется условие $\sigma_i \geq d_{ij}^- (i = \overline{1, n})$, тогда переход t_j разрешен и выполняется переход к шагу 8;

Шаг 7. если для перехода t_j условие срабатывания не выполняется, тогда индекс j увеличивается на единицу: $j = j + 1$. В случае выполнения условия $j \leq m$, выполняется переход к шагу 6, в противном случае сообщается о типовом состоянии и выполняется переход к концу алгоритма.

Шаг 8. Определяется степень принадлежности q_j нечеткого срабатывания перехода t_j :

8.1. В случае выполнения условия $d_{ij}^- \neq 0, (i = \overline{1, n})$ присваивается: $q_j = const > 1$; $max = const < 1$ и выполняется переход к п. 8.2;

8.2. В случае выполнения условия $\mu_{ir} > max$ присваивается $max = \mu_{ir}$, ($r = d_{ij}^- + 1, d + 1$);

8.3. В случае выполнения условия $(max < q_j) \wedge (max > 0)$, тогда полагают $q_j = max$, где \wedge – операция логического минимума;

Шаг 9. Вычисление элементов матрицы новой маркировки M' :

9.1. Для всех $d_{ij}^- \neq 0, (i = \overline{1, n})$ вычисляется:

9.1.1. Полагают $max = \mu_{i1}$, если $\mu_{ir} > max$, тогда присваивается: $max = \mu_{ir}$, ($r = d_{ij}^- + 1$); $\mu'_{i1} = max$;

9.1.2. $\mu'_{ir} = \mu_{i, r+d_{ij}^-}, r = \overline{2, d+1}$;

9.2. Для всех $d_{ij}^+ \neq 0, (i = \overline{1, n})$ вычисляется:

9.2.1. В случае выполнения условия $\mu_{ir} < 1 - q_j$ присваивается $\mu'_{ir} = \mu_{ir}$, иначе $\mu'_{ir} = 1 - q_j$, ($r = \overline{1, d_{ij}^+}$);

9.2.2. В случае выполнения условия $\mu_{ir} < 1 - q_j$ присваивается $min1 = \mu_{ir}$, иначе $min1 = 1 - q_j$; в случае выполнения условия $\mu_{i, r-d_{ij}^+} < q_j$ присваивается $min2 = \mu_{i, r-d_{ij}^+}$, иначе $min2 = q_j$; в случае выполнения условия $min1 > min2$ присваивается $\mu'_{ir} = min1$, в противном случае $\mu'_{ir} = min2$, для всех $r = \overline{d_{ij}^+ + 1, d + 1}$.

Шаг 10. Полагается:

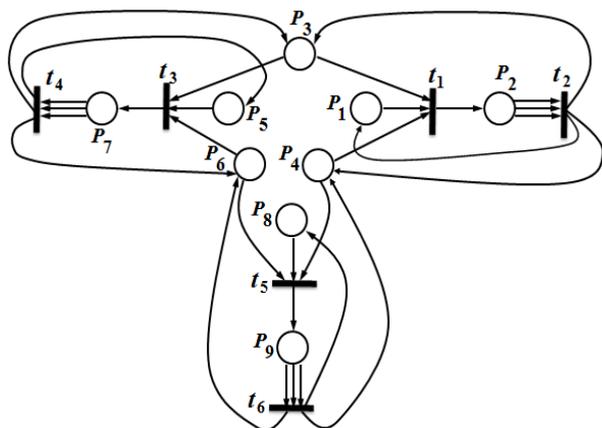
$\mu_{ir} = \mu'_{ir}; (i = \overline{1, n}; r = \overline{1, d+1})$ и осуществляется переход к шагу 5.

Модель модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в системе механообработки

Рассмотрим типовой обрабатывающий центр механообработки, состоящий из трех персональных входных накопителей, из трех параллельно функционирующих однотипных обрабатывающих устройств (ОУ) для выполнения одинаковой операции над разными однотипными заготовками и из трех персональных выходных накопителей. На модуле обрабатываются детали одного типа. Заготовки поступают на персональные входные накопители и ожидают обработку. Одно свободное устройство захватывает заготовку из левого или правого входного накопителя. Если все устройства свободны, то возникает конфликтная ситуация. Конфликт разрешается случайным выбором нечеткими законами композиции. Обработанные детали поступают на выходные накопители и ожидают отправку.

В граф-модели НСПВ_f модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки (рисунок) состояния сети описываются следующими позициями: p_1, p_5, p_8 – соответственно ОУ1, ОУ2, ОУ3 в исходном состоянии и в режиме ожидания; p_3, p_4, p_6 – соответственно наличие заготовки во входных накопителях и входные накопители свободны; p_2, p_7, p_9 – соответственно ОУ1, ОУ2, ОУ3 в конечном состоянии и на выходных накопителях находится обработанный деталь.

Возможные события в модуле описываются следующими переходами: t_1, t_3, t_5 – начинается обработка заготовки соответственно в ОУ1, ОУ2, ОУ3; t_2, t_4, t_6 – заканчивается обработка заготовки соответственно в ОУ1, ОУ2, ОУ3.



Граф-модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств

Матрица входных инцидентов $D^-(6,9)$ и матрица выходных инцидентов $D^+(6,9)$ переходов сети описываются, соответственно, следующим образом:

$$D^-(6,9) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}$$

$$D^+(6,9) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Начальная маркировка сети представляется матрицей $\mu^0(9,4)$:

$$\mu^0(9,4) = \begin{pmatrix} 0.30 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.50 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.6 & 0.9 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

На основе начальных данных был проведен компьютерный эксперимент и получены следующие результаты:

$$\mu^1(9,4) = \begin{pmatrix} 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.60 \\ 0.70 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

$$\mu^2(9,4) = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

$$\mu^3(9,4) = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.70 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.90 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

$$\mu^4(9,4) = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

$$\mu^5(9,4) = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \end{pmatrix}$$

$$\mu^6(9,4) = \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}$$

Из начальной маркировки получена последовательность срабатывания переходов $\sigma = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)$.

Заключение

Предложен и разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов нечетких СП типа V_f . Разработанный алгоритм обеспечивает:

1. Моделирование сложных распределенных параллельных систем, функционирующих в условиях нечеткости и неопределенности.
2. Преобразование внешних данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования.

Поступила 19.03.2019; принята к публикации 31.05.2019

Информация об авторах

Мустафаев Валех Азад оглы - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика», Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994505342506, e-mail: valex_sdu@mail.ru

Салманова Малахат Насиман кызы - аспирант кафедры «Информатика», Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994507562828, e-mail: malaxat_70@mail.ru

MODELING DYNAMIC INTERACTION PROCESSES USING FUZZY PETRI NETS OF V_f TYPE

V.A. Mustafaev, M.N. Salmanova

Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

Abstract: the modeling of complex parallel and distributed systems describing the functioning of dynamic objects in conditions of uncertainty is considered. An approach is proposed for modeling complex distributed parallel systems, which is based on the mathematical apparatus of fuzzy Petri V_f networks (FPNV_f), which are extensions of ordinary Petri nets with position marking uncertainty. The rule of triggering transitions and the dynamics of changes in the initial and subsequent markings

3. Сокращение числа входных и выходных позиций переходов и размерность пространства достижимых состояний.

4. Разрешение срабатывания возбужденных переходов, находящихся в состоянии конфликта, и автоматическое выявление тупиковых ситуаций.

На основе предложенного алгоритма разработана модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки.

Результаты компьютерных экспериментов подтверждают, что предлагаемый алгоритм и предложенный подход позволяют моделировать реальные распределенные системы, функционирующие в условиях неопределенности.

Литература

1. Емельянова Г.М., Смирнова Е.И. Сети Петри в задачах моделирования сложных систем. Нечеткая сеть Петри. М., 2002. 264 с.
2. Окрестностное моделирование сетей Петри: монография / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин, И.А. Седых, В.Ю. Филоненко. Липецк: ЛЭГИ, 2010. 124 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 717 с.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
5. Котов В.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
6. Мустафаев В.А., Салманова М.Н. Разработка модели функционирования обрабатывающего центра с применением нечетких временных сетей Петри// Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С.13-19.

of $FPNV_f$ are determined. An algorithm for the operation and calculation of the structural elements $FPNV_f$ is developed. The proposed algorithm effectively converts real-world data into the internal format used in the modeling environment, solves the problem of solvability of transitions that are in conflict, automatically identifies deadlocks, simplifies and speeds up the modeling process. Using the example of a module of parallel processing devices, it is shown that, the resulting transition sequence fully describes the operation process of the $FPNV_f$. On the basis of a computer experiment, a reachability diagram was obtained as a sequence of matrices

Key words: model, algorithm, fuzzy Petri Nets, incidence matrix, processing module

References

1. Emel'yanova G.M., Smirnova E.I. "Petri nets in problems of modeling complex systems. Fuzzy Petri net" ("Seti Petri v zadachakh modelirovaniya slozhnykh sistem. Nechetkaya set' Petr"), Moscow, 2002, 264 p.
2. Blyumin S.L., Shmyrin A.M., Sedykh I.A., Filonenko V.Yu. "Neighborhood modeling of Petri nets: monograph" ("Okrestnostnoe modelirovanie setey Petri: monografiya"), Lipetsk, LEGI, 2010, 124 p.
3. Leonenkov A.V. "Fuzzy modeling in environments MATLAB and fuzzy TECH" ("Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy TECH") St. Petersburg, BHV–Peterburg, 2005, 717 p.
4. Peterson J. "Petri net theory and the modeling of systems" ("Teoriya setey Petri i modelirovaniya sistem"), Moscow, Mir, 1984, 264 p.
5. Kotov V.E. "Petri nets" ("Seti Petri"), Moscow, Nauka, 1984, 160 p.
6. Mustafayev V.A., Salmanova M.N. "Development of the model of operation center functioning with the application of the fuzzy timed Petri nets", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, vol. 14, no. 3, 2018, pp.13-19.

Submitted 19.03.2019; revised 31.05.2019

Information about the authors

Valeh Azad oglu Mustafaev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: valex-sdu@mail.ru

Malahat Nasiman gizi Salmanova, Graduate Student, Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: malaxat_70@mail.ru

ОБРАБОТКА И РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПОСРЕДСТВОМ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**В.Г. Бондарев¹, Д.А. Смирнов¹, Н.И. Майгурова¹, А.В. Николенко¹, К.Ю. Гусев²****¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия****²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: одним из многообещающих средств измерения и навигации на транспорте являются системы технического зрения. Наиболее актуальным направлением применения систем технического зрения выступает решение задачи автоматизации сложных этапов полета летательных аппаратов. Рассмотрение подобных задач актуально как для военных летательных аппаратов, так и для гражданской авиации. В работе решается задача по определению центра яркости маяка для осуществления посадки, локальной навигации в окрестности аэродрома с помощью алгоритма, основанного на аппроксимации зависимости яркости пикселей, образующих полуконтрастную границу круга с использованием бинаризации изображения светодиода маяка; предложен способ распознавания объектов с помощью сравнения форм изображений как простых, так и сложных с описанием контуров бинаризованных изображений, сравнения форм контуров особенностей по правилам, напоминающим процедуру вычитания чисел, при этом для определения центра яркости изображения объекта учитывалась яркость пикселей как внутри контура, так и соседних (приграничных) пикселей изображения. Именно посредством такой комбинации алгоритмов и методов данные задачи решены в полном объеме, а результаты работы могут быть реализованы на практике с повышенными показателями точности

Ключевые слова: летательные аппараты, система технического зрения, центр яркости маяка, яркость пикселей, форма изображения, контуры бинаризованных изображений

Введение

Характерной чертой современного этапа технического прогресса является бурное развитие средств навигации и измерительной техники, уровень которых во многом определяет эффективность применения транспортных систем. Одним из многообещающих средств измерения и навигации на транспорте являются системы технического зрения. Наиболее актуальным направлением применения систем технического зрения является решение задач автоматизации сложных этапов полета летательных аппаратов (ЛА) [1, 2]. Такими задачами принято считать посадку самолетов на аэродром, посадку самолетов и вертолетов на авианосец, дозаправку топливом в воздухе, полет строем, облет препятствий, боевое применение оружия, навигация.

Обработка изображений в интересах измерений посредством системы технического зрения сводится к определению координат локальных особенностей этих изображений на фотоматрицах, а также нахождению этих особенностей на фотоматрице второй фотокамеры (стереоотождествление) либо на той же фотоматрице в последующий момент времени [3].

Постановка задачи

Таким образом, возникают две задачи: во-первых, определение центра яркости маяка для осуществления посадки, локальной навигации окрестностей аэродрома и, во-вторых, сравнение форм изображений объектов для их распознавания как простых, так и сложных, которые, как показывает опыт, никогда не бывают тождественными. Изображения всегда отличаются геометрически, при этом меняющиеся условия освещения приводят к геометрическим искажениям формы при бинаризации и, наконец, имеют место различия параметров фотокамер для бинокулярной системы технического зрения. Поэтому необходим простой с точки зрения программирования способ описания формы изображений объектов, а также способ сравнения форм, несколько отличающихся друг от друга, поддающийся алгоритмизации.

Изображение маяка представляет собой фигуру близкую к кругу диаметром десятки пикселей. Причем центральная область изображения с диаметром около 15 пикселей близка к величине изображения светодиода, вычисленной по законам геометрической оптики, что показывает рис. 1 [4].

Очевидно, что определить центр такого большого изображения светодиода маяка с высокой точностью (порядка 0,1 пикселя)

представляется весьма сложной задачей. Тем более, что изображение на фотоматрице формируется при наличии шумов фотоматрицы, накладываемых на собственно изображение, полученное объективом.



Рис. 1. Изображение светодиодного маяка на фотоматрице

Рассмотрим более детально изображение маяка на фотоматрице. Для этого выделим строку и столбец, пересекающиеся в центре изображения, и построим графики изменения яркости сигналов $R(i)$, $G(i)$, $B(i)$ в зависимости от номера пикселя по строке и $R(j)$, $G(j)$, $B(j)$ по столбцу (рис. 2).

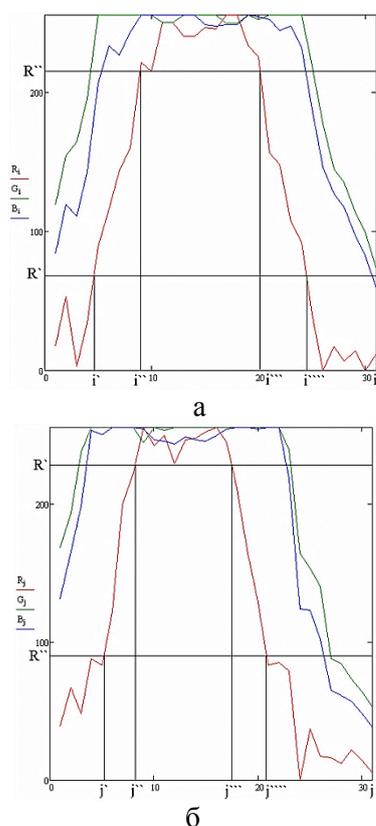


Рис. 2. Графики изменения яркости сигналов: а - зависимость от номера пикселя по строке; б - зависимость от номера пикселя по столбцу

Оба рисунка показывают, что сигналы $R(i)$ и $R(j)$ обеспечивают более узкую кривую, использование которой позволяет достигнуть большей точности определения центра изображения.

Поскольку использование стандартной программы определения центра круга, описывающего изображение маяка, дает плохой результат, связанный со значительными флуктуациями положения этого центра, то рассмотрим алгоритм, основанный на аппроксимации зависимости яркости пикселей, образующих полуконтрастную границу круга [4].

Центр яркости изображения маяка

Воспользуемся механической аналогией этой задачи. Будем считать распределение массы плоской металлической пластины аналогом распределения яркости изображения по фотоматрице. Выполним бинаризацию изображения светодиодного маяка, причем в качестве порогового значения выберем величину близкую к половине наибольшего значения яркости $R_{пор} = 130$ ($\approx 255/2$), такой выбор следует из зависимости яркости на рис. 1 и 2. Пусть средняя часть изображения маяка удовлетворяет условию $R_{ij} \geq R_{пор}$ (где i и j номера пикселей в строке и столбце соответственно для области K).

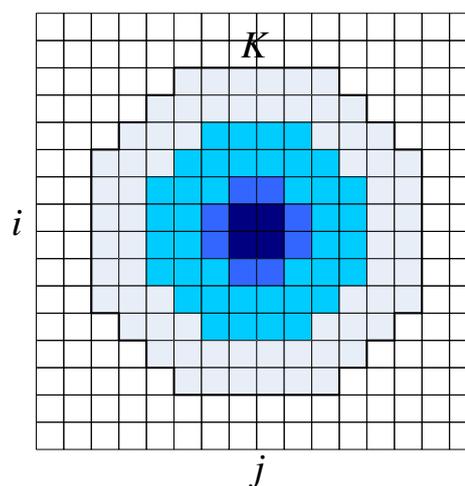


Рис. 3. Изображение маяка

Тогда координаты центра яркости изображения маяка (по аналогии с центром массы пластины) вычислим следующим образом

$$X_o = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} \cdot r \cdot (j-1/2)}{r \cdot R} = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} \cdot (j-1/2)}{R}, \quad (1)$$

$$Y_o = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} \cdot r \cdot (i-1/2)}{r \cdot R} = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} \cdot (i-1/2)}{R}, \quad (2)$$

где r – размер пикселя, R_{ij} – яркость красного пикселя в зависимости от номера строки (i) и столбца (j), K – область изображения, удовлетворяющая условию $R_{ij} \geq R_{нор}$, $R = \sum_{i,j \in K} R_{ij}$ – мощность излучения области K .

Метод наименьших квадратов

Рассмотрим участки кривой $R_i(i)$ между уровнями $R=0,3 \cdot 255$ и $R=0,8 \cdot 255$ (i^* , i^{**}) и (i^{***} , i^{****}). Аппроксимируем эти участки отрезками прямой, при этом используем метод наименьших квадратов.

Эту экспериментальную зависимость можно описать сглаживающей линейной функцией

$$R_i = a_n i + b_n. \quad (3)$$

По экспериментальным данным вычислим коэффициенты уравнения a_n и b_n для интервала (i^* , i^{**})

$$a_n = \frac{\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} i \cdot R_i - \left(\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} i \right) \left(\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} R_i \right)}{\left(\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} i^2 \right) - \left(\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} i \right)^2}. \quad (4)$$

$$b_n = \frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} R_i - \left(\frac{1}{i^{**}-i^*} \sum_{i^*}^{i^{**}} i \right) a_n$$

Для интервала (i^{***} , i^{****}) примем, что $a_n = -a_n$, тогда

$$b_n = \frac{1}{i^{****}-i^{***}} \sum_{i^{***}}^{i^{****}} R_i + \left(\frac{1}{i^{****}-i^{***}} \sum_{i^{***}}^{i^{****}} i \right) a_n. \quad (5)$$

Найдем середину интервала в строке по уровню $R_o = 0$, для этого найдем координаты точек пересечения уровня с прямыми

$$\begin{aligned} i_n &= \frac{b_n}{\alpha_n} \\ 0 &= -\alpha_n \cdot i_n + b_n \\ 0 &= \alpha_n \cdot i_n + b_n \end{aligned} \quad \begin{aligned} i_n &= -\frac{b_n}{\alpha_n} \\ i_o &= \frac{i_n + i_n}{2} = \frac{b_n - b_n}{2\alpha_n} \end{aligned}$$

Середина интервала в столбце по уровню R_o вычисляется аналогично

$$j_o = \frac{j_n + j_n}{2} = \frac{b_n - b_n}{2\alpha_n}$$

Поскольку в области (i^* , i^{**}) и (i^{***} , i^{****}) попадает всего порядка 5 пикселей, что явно недостаточно для получения достоверных оценок коэффициентов α и b , то целесообразно использовать вместо одной строки и столбца 3 или 5 (одну-две ниже-выше средней строки и одну-две левее-правее среднего столбца). Затем средние значения координат центра изображения по всем строкам и столбцам осредняются.

Таким образом, выполнено вычисление координат центра яркости маяка для его захвата ЛА при осуществлении посадки, навигации в окрестности аэродрома и рулении до места стоянки с помощью бинакулярной системы технического зрения.

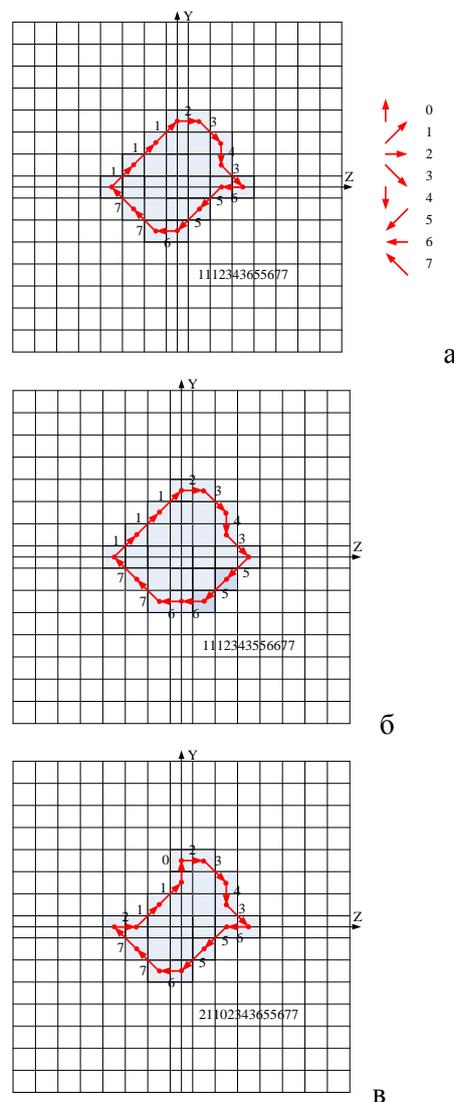


Рис. 4. Кодирование контура особенности и сравнение особенностей

Для решения задачи сравнения форм изображений объектов при их распознавании, рассмотрим способ описания контуров бинаризованных изображений, для чего примем следующие правила. Элементарный участок контура между двумя соседними пикселями обозначим цифрами 0, 1, ..., 7 (рис. 4а). Цифра 0 соответствует участку между двумя вертикально расположенными пикселями в направлении оси Y, цифрой 1 описываем участок между соседними диагонально расположенными пикселями (рис. 4а), и так далее – всего восемь участков.

Кодирование элементарных участков начинаем с самого левого в направлении часовой стрелки. На рис. 4а, 4б и 4в показаны бинаризованные изображения, отличающиеся на два пикселя (4б – на два пикселя меньше, 4в – на два больше), под рисунками приведены кодовые комбинации цифр, описывающие формы их контуров.

Сравнение форм контуров особенностей выполним по правилам, напоминающим процедуру вычитания чисел:

- для контуров на рисунках а и б

1	1	1	2	3	4	3	6	5	5	6	7	7	
-	1	1	1	2	3	4	3	5	5	6	6	7	7
=	0	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	
- для контуров на рисунках а и в

0	1	1	1	2	3	4	3	6	5	5	6	7	7	
-	2	1	1	0	2	3	4	3	6	5	5	6	7	7
=	-2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Результат такого сравнения показывает, что небольшие отклонения в форме особенностей соответствуют малой разности кодовых последовательностей. Расположение аномалии на контуре соответствует положению ненулевых цифр в разности, положение нулевых цифр в разности соответствует совпадающему по форме участку контура.

Таким образом, сравнение трех контуров показывает, что совпадающими участками контуров являются 677 и 2343, для таких участков контуров можно применять методы Лукаса-Канаде, FAST, Гарриса и т. д. [6-8].

Анализ формы изображений объекта

Рассмотрим признаки формы изображений по их кодовым комбинациям для различных геометрических фигур. Прямая линия (рис. 5), направление которой имеет угол наклона к координатным линиям $n \cdot 45^\circ$ (n – целое число) кодируется в виде последовательности из одной цифры (0, ..., 7). Если прямая линия наклонена под произвольным

углом, то цифровая последовательность содержит тоже одну цифру, но с периодическим добавлением другой цифры, отличающейся на единицу (рис. 5).

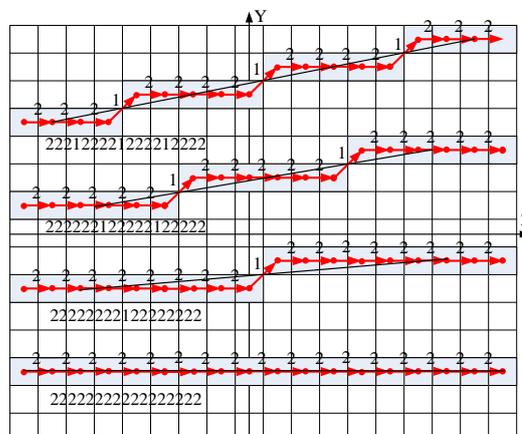


Рис. 5. Прямая

Кодовая последовательность, описывающая квадрат, содержит либо четыре фрагмента цифр 0, 2, 4, 6 или 1, 3, 5, 7 одинаковой длины, либо четыре одинаковых фрагмента, описывающих отрезки прямых с наклоном не равным $n \cdot 45^\circ$ (рис. 6).

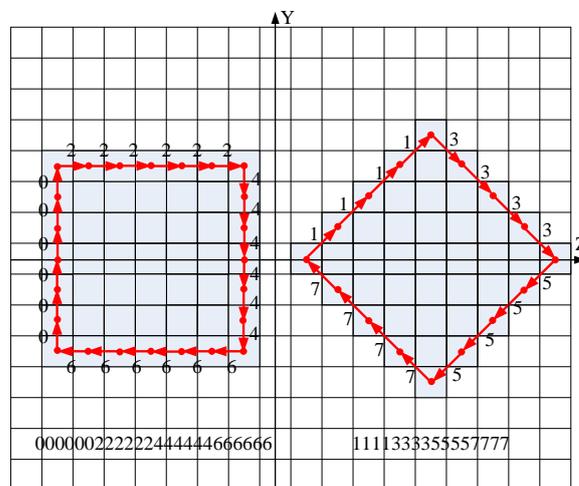


Рис. 6. Квадрат

Квадраты, показанные на рисунке, имеют практически равные размеры (периметр), но кодовые последовательности имеют существенно разную длину, поэтому сравнение одинаковых фигур, имеющих различную ориентацию, не может быть выполнено по рассмотренному выше алгоритму. Следует оговорить причину этого, дело в том, что участки последовательности, кодируемые нечетными

статического момента функции $R(Y)$ на интервале gp , определяемом порогом бинаризации R_b (рис. 6).

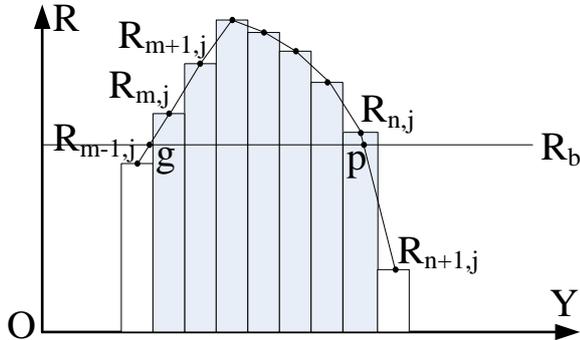


Рис. 9. Аналоговое представление функции яркости

Запишем выражение для координат центров пикселей

$$Y_{ij} = (i - 0.5) \cdot l_p,$$

где l_p — размер пикселя, j — номер строки.

Найдем координаты границы области бинаризации gp по линеаризованной аналоговой функции яркости в точках пересечения с уровнем R_b

$$Y_{gj} = \frac{l_p [R_b - R_{mj} + (R_{mj} - R_{m-1j})(m_j - 0.5)]}{(R_m - R_{m-1j})},$$

$$Y_{pj} = \frac{l_p [R_b - R_{nj} + (R_{n+1j} - R_{nj})(n_j - 0.5)]}{(R_{n+1j} - R_{nj})}.$$

Пусть известны значения яркости пикселей $R_{ij} = R(Y_{ij})$, тогда R_j — интегральную яркость j -й бинаризованной строки (по аналогии с маской) выразим следующим образом

$$R_j = 0.5(Y_{mj} - Y_{gj})(R_b + R_{mj}) / l_p + 0.5(Y_{pj} - Y_{nj})(R_b + R_{nj}) / l_p + \sum_{i=m}^n 0.5(R_{ij} + R_{i+1j}).$$

Суммируя яркость всех строк изображения объекта, определим его интегральную яркость

$$R = \sum_{j=k_1}^{k_2} R_j,$$

где k_1, \dots, k_2 — номера строк изображения объекта.

Теперь выразим статические моменты j -й строки изображения относительно оси Z и Y

$$M_{zj} = 0.25(Y_{mj} - Y_{gj})(Y_{mj} + Y_{gj})(R_b + R_{mj}) + 0.25(Y_{pj} - Y_{nj})(Y_{pj} + Y_{nj})(R_b + R_{nj}) + \sum_{i=m}^n 0.5(R_{ij} + R_{i+1j})(i - 0.5)l_p$$

$$M_{yj} = 0.25(Y_{mj} - Y_{gj})(j - 0.5)(R_b + R_{mj}) + 0.25(Y_{pj} - Y_{nj})(j - 0.5)(R_b + R_{nj}) + (j - 0.5)l_p \sum_{i=m}^n 0.5(R_{ij} + R_{i+1j})$$

Суммируя по строкам, получим статические моменты изображения всего объекта относительно оси Z и Y

$$M_z = \sum_{j=k_1}^{k_2} M_{zj}, \quad M_y = \sum_{j=k_1}^{k_2} M_{yj}.$$

Выразим искомые координаты центра яркости изображения объекта

$$Z = \frac{M_z}{R}, \quad Y = \frac{M_y}{R}.$$

Отметим, что именно переход к аналоговому представлению функции яркости и определение центра яркости фрагмента изображения, отсеченного порогом бинаризации, дает субпиксельную информацию о положении этого центра яркости. Кроме этого, интегральный учет положения центра яркости объекта обеспечивает фильтрацию шумов фотоматрицы, что также способствует повышению точности результата измерения, основанного на этих первичных манипуляциях [10].

Заключение

Таким образом, задачи по определению центра яркости маяка для осуществления посадки, локальной навигации в окрестности аэродрома были решены с помощью алгоритма, основанного на аппроксимации зависимости яркости пикселей, образующих полуконтрастную границу круга с использованием бинаризации изображения светодиодного маяка.

Для распознавания объектов с помощью сравнения форм изображений как простых, так и сложных использовали способ описания контуров бинаризованных изображений, сравнение форм контуров особенностей по правилам, напоминающим процедуру вычитания чисел, в том числе при совпадении участков контуров можно применять методы Лукаса-Канаде, FAST, Гарриса и т.д. При этом для определения центра яркости изображения объекта была учтена яркость пикселей как внутри контура, так и соседних (приграничных) пикселей изображения.

Именно комбинация использованных алгоритмов и методов дает возможность решать данные задачи в полном объеме.

Литература

1. Бондарев В.Г., Смирнов Д.А. Автономная инфракрасная система посадки самолета на основе системы технического зрения // Современное состояние и перспективы развития систем авиационного оборудования: материалы межвуз. науч.-практ. конф. Воронеж: Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА, 2018. С. 19-21
2. Бондарев В.Г., Лопаткин Д.В., Смирнов Д.А. Автоматическая посадка летательного аппарата // Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 2. С. 44-51.
3. Молчанов А.С. Оценка качества изображений в задачах технического зрения, методов математического моделирования с использованием критерия Шадэ // Техническое зрение в системах управления - 2016: тез. докл. науч.-техн. конф. М.: Изд-во ИКИ РАН, 2016. С. 29.
4. Соул Х. Электроннооптическое фотографирование: сокр. пер. с англ. П. Горохова и В. Горшкова; под

ред. В. Базарова и И. Усольцева. М.: Воениздат, 1972. 404 с.

5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: учеб. пособие для физ.-мат. специальн. вузов; под общ. ред. Н.И. Тихонова. 2-е изд. М.: Физматлит: Лаб. базовых знаний, 2002. 630 с.
6. Lucas B.D., Kanade T. An Iterative Image Registration Technique with an Application to Stereo Vision // Proceedings of the international conference. 1981. Vol. 2. P. 674-679.
7. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // Proceedings of the conference. 1988. P. 147-151.
8. Trajkovic M., Hedley M. Fast corner detection // Image and Vision Computing. 1998. Vol. 16 (2). P. 75-87.
9. Молчанов А.С. Основы построения и оценка качества иконических оптико-электронных средств воздушной разведки. Волгоград: Панорама, 2016. 143 с.
10. Зуев В.Е., Фадеев В.Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.

Поступила 16.04.2019; принята к публикации 30.05.2019

Информация об авторах

Бондарев Валерий Георгиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации авиационного оборудования факультета авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), тел. (473) 244-78-37, e-mail: bondarevstis@mail.ru

Смирнов Дмитрий Андреевич - курсант факультета авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), тел. (473) 244-78-37

Майгурова Нина Ивановна - научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), тел. (473) 244-78-37, e-mail: nina.vsu@gmail.com

Николенко Александр Владимирович - инженер 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), тел. (473) 244-78-37, e-mail: Nikolenko.Alexandr.93@yandex.ru

Гусев Константин Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. (473)243-77-20, e-mail: gusev_konstantin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0517-5737>

PROCESSING AND RECOGNITION OF OBJECT IMAGES OBTAINED VIA THE MACHINE VISION SYSTEM OF AN AIRCRAFT

V.G. Bondarev¹, D.A. Smirnov¹, N.A. Maygurova¹, A.V. Nikolenko¹, K.Yu. Gusev²

¹Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia
²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: one of the promising means of measurement and navigation in transport is the system of technical vision. The most actual direction of application of systems of technical vision is the solution of a problem of automation of difficult stages of an aircraft's flight. The solution of such problems is relevant for both military aircraft and civil aviation. The paper deals with the problem of determining the brightness center of the beacon for landing, local navigation in the vicinity of an airfield using an algorithm based on the approximation of the dependence of the pixel brightness forming a semi-contrast boundary of the circle using binarization of the image of the led beacon; the method of recognition of objects by comparing the shapes of images both simple and complex with the description of the contours of binary images, comparing the shape of the contours of features according to the rules resembling the procedure of subtraction of numbers, while to determine the center of brightness of the image of the object the brightness of pixels both inside the contour and adjacent (border) pixels of the image was taken into account. It is through this combination of algorithms and methods that these problems are solved in full, and the results of the work can be implemented in practice with increased accuracy

Key words: aircraft, machine vision system, beacon brightness center, pixel brightness, image form, contours of binary images

References

1. Bondarev V.G., Smirnov D.A. "Autonomous infrared landing system based on the system of technical vision", *Proc. of Interuniversity Science.-Prakt. Conf.: Current State and Prospects of Development of Systems of Aviation Equipment (Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistem aviatsionnogo oborudovaniya: materialy mezhvuz. nauch.-prakt. konf.)*, Voronezh, MSEC MAF MAA, 2018, pp. 19-21.
2. Bondarev V.G., Lopatkin, D.V., Smirnov D.A. "Automatic landing of the aircraft", *Bulletin of VSU (Vestnik VGU)*, 2018, no. 2, pp. 44-51.
3. Molchanov A. S. "Assessment of image quality in problems of technical vision, methods of mathematical modeling using the Shade criterion", *Proc. of Science.-Tech. Conf. "Technical Vision in Control Systems - 2016" (Tekhnicheskoe zrenie v sistemakh upravleniya - 2016: tez. dokl. nauch.-tekhn. konf.)*, Moscow, Publishing house of IKI RAS, 2016, p. 29.
4. Soul H. "Electron-Optical photography" ("Elektronnoopticheskoe fotografirovanie"), ed. V. Bazarov and I. Usoltseva, Moscow, Voenizdat, 1972, 404 p.
5. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. "Numerical methods: manual" ("Chislennyye metody: ucheb. posobie dlya fiz.-mat. spetsial'n. Vuzov"), ed. N.I. Tikhonov, Moscow, Fizmatlit, 2002, 630 p.
6. Lucas B.D., Kanade T. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision", *Proc. of the international conference*, 1981, vol. 2, pp 674-679.
7. Harris C., Stephens M. "A combined corner and edge detector", *Proc. of the conference*, 1988, pp. 147-151.
8. Trajkovic M., Hedley M. "Fast corner detection", *Image and Vision Computing*, 1998, vol. 16 (2), pp. 75-87.
9. Molchanov A.S. "Fundamentals of construction and quality assessment of iconic optical-electronic aerial reconnaissance tools" ("Osnovy postroeniya i otsenka kachestva ikonicheskikh optiko-elektronnykh sredstv vozdushnoy razvedki"), Volgograd, Panorama, 2016, 143 p.
10. Zuev V.E., Fadeev V.Ya. "Laser navigation devices" ("Lazernyye navigatsionnyye ustroystva"), Moscow, Radio i svyaz', 1987, 160 p.

Submitted 16.04.2019; revised 30.05.2019

Information about the authors

Valeriy G. Bondarev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. (473) 244-78-37, e-mail: bondarevstis@mail.ru

Dmitriy A. Smirnov, Student, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. (473) 244-78-37

Nina I. Maygurova, Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. (473) 244-78-37, e-mail: nina.vsu@gmail.com

Aleksandr V. Nikolenko, Engineer, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. (473) 244-78-37, e-mail: Nikolenko.Alexandr.93@yandex.ru

Konstantin Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. (473) 243-77-20, e-mail: gusev_konstantin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0517-5737>

**СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
С ЗАДАНЫМ ЗАПАСОМ УСТОЙЧИВОСТИ****В.С. Кудряшов¹, М.В. Алексеев¹, А.В. Иванов¹, О.А. Орловцева², И.В. Иванова³**¹Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³ООО НПФ «Компьютерные сети», г. Воронеж, Россия

Аннотация: статья посвящена решению задачи разработки адаптивной цифровой системы, которая может быть использована для управления различными технологическими процессами. Проведен анализ типовой адаптивной цифровой системы управления с настраиваемой моделью, в которой оптимизация настроек цифрового регулятора выполняется на каждом такте квантования по адаптируемой модели объекта, что значительно увеличивает вычислительную нагрузку на систему. Предлагается оптимизацию настроек цифрового регулятора выполнять только при снижении запаса устойчивости системы. Для этого разработано математическое и программное обеспечение исследования запаса устойчивости по критерию Найквиста при дрейфе параметров системы. Установлена связь между «запретной областью», характеризующей запас устойчивости, и динамической характеристикой замкнутой системы управления. Выполнен синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости, отличающейся от типовой адаптивной системы включением блока анализа, который позволяет оценить запас устойчивости по критерию Найквиста и определить момент для оптимизации настроек цифрового регулятора. При этом запас устойчивости задается по требованиям ведения конкретного технологического процесса. Проведенные исследования с различными параметрами моделей объекта управления показали эффективность предлагаемой адаптивной цифровой системы

Ключевые слова: адаптивная система, модель объекта, цифровой регулятор, запас устойчивости

Введение

На современной стадии развития автоматизированные системы управления технологическими процессами представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы, в рамках которых осуществляется сбор больших массивов данных о ходе технологического процесса, аналитическая обработка полученной информации, ее визуальное отображение посредством человеко-машинных интерфейсов, формирование управляющих воздействий на исполнительные устройства и т.д. [1]. Характерной особенностью многих процессов химической и пищевой технологии (таких как ректификация, дегидрирование углеводородов, полимеризация и др.), оказывающей существенное влияние на качество управления, является нестационарность, обусловленная дрейфом статических и динамических характеристик объектов в процессе эксплуатации.

Постановка задачи

Использование традиционных систем управления (СУ), не обеспечивающих автоматической корректировки своих

параметров (с учетом нестационарности объектов), приводит со временем к ухудшению управления, а иногда и к неустойчивости систем [2]. Анализ подходов к решению этой задачи показывает, что для достижения поставленной цели одним из наилучших вариантов решения является синтез адаптивных систем управления.

**Описание алгоритма управления
в адаптивной системе**

В работе приводится описание математического и программного обеспечения для исследования запаса устойчивости по критерию Найквиста, результаты проведенных исследований и разработанная адаптивная цифровая система управления (АЦСУ) с заданным запасом устойчивости.

Цель адаптивного управления – обеспечение заданного значения выбранного критерия качества работы системы при изменении свойств объекта. Одним из вариантов реализации адаптивного управления является синтез АЦСУ с настраиваемой моделью (рис. 1) [2, 3].

Система работает следующим образом. Цифровой регулятор вырабатывает управляющее воздействие согласно величине рассогласования:

$$u_i = u_{i-1} + \sum_{l=0}^{m-1} q_l \cdot (y_{i-l}^3 - y_{i-l}), \quad (1)$$

где u_i - выход цифрового регулятора на i -ом такте квантования T_0 ; m - порядок регулятора; q_l - настроечные параметры.

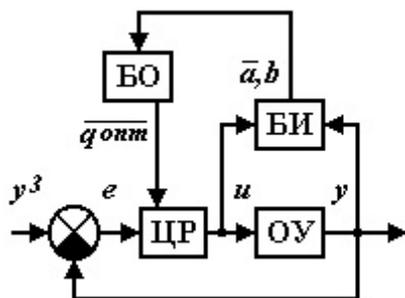


Рис. 1. Структурная схема АЦСУ:
 ЦР – цифровой регулятор; ОУ – объект управления;
 БИ – блок идентификации; БО – блок оптимизации;
 y^3 – задающее воздействие; e – величина рассогласования; u – управляющее воздействие;
 y – регулируемый параметр; \bar{a}, \bar{b} – параметры настраиваемой (адаптируемой) модели ОУ; \bar{q}^{opt} – оптимальные настройки ЦР

По текущим измерениям входа u_i и выхода y_i объекта в блоке идентификации (БИ) выполняется адаптация настраиваемой дискретной модели ОУ:

$$y_i = \sum_{k=1}^n a_k \cdot y_{i-k} + b \cdot u_{i-1-d}, \quad (2)$$

где n - порядок модели; $a_k (k = \overline{1, n}), b$ - параметры; d - целое число тактов запаздывания T_0 .

Текущая адаптация дискретной модели объекта (2) проводится рекуррентным методом наименьших квадратов (РМНК) [3,4], показывающим высокую скорость сходимости:

$$a_k^{N+1} = a_k^N + \frac{1}{\gamma_{ak}^N} \cdot \varepsilon^N \cdot y_{N+1-k}, \quad k = \overline{1, n};$$

$$b^{N+1} = b^N + \frac{1}{\gamma_b^N} \cdot \varepsilon^N \cdot u_{N-d}, \quad (3)$$

где N - номер такта адаптации;
 $\gamma_{ak}^N = \sum_{j=N-Nn}^{N+1} (y_{j-k})^2, \quad k = \overline{1, n};$

$\gamma_b^N = \sum_{j=N-Nn}^{N+1} (u_{j-1-d})^2$ - накапливаемые значения

сумм квадратов выхода и входа модели объекта за последние Nn -тактов ($Nn=20 \div 50$);

$\varepsilon^N = y_{N+1} - \sum_{k=1}^n a_k^N \cdot y_{N-k} - b^N \cdot u_{N-d}$ - ошибка адаптации.

Уточненные (адаптированные) параметры дискретной модели объекта \bar{a}, \bar{b} (вместе с текущими настройками ЦР) передаются в блок оптимизации БО, где выполняется расчет оптимальных настроек \bar{q}^{opt} градиентным методом оптимизации [3, 5]. Полученные настройки \bar{q}^{opt} передаются в ЦР и используются для расчета управляющего воздействия u_i на следующем такте квантования.

Исследование запаса устойчивости по критерию Найквиста

Чтобы СУ эффективно работала, необходимо, чтобы она обладала необходимым запасом устойчивости. Существуют алгебраические и частотные критерии устойчивости [6]. Смысл алгебраических критериев устойчивости (Рауса, Гурвица и т.д.) заключается в том, что знаки корней дифференциальных уравнений оценивают путем оперирования с коэффициентами этих уравнений. Частотные критерии устойчивости позволяют достаточно наглядно провести анализ устойчивости либо по частотным характеристикам объектов и СУ, либо по их частям.

Воспользуемся критерием Найквиста, который удобен для исследования систем, описываемых дифференциальными уравнениями высоких порядков, для которых использование алгебраических критериев требует громоздких и сложных вычислений.

По критерию Найквиста замкнутая система будет устойчива, если амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) устойчивой разомкнутой системы при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$ не охватывает точку с координатами $(-1; j0)$. Из данной формулировки следует, что для анализа устойчивости замкнутой системы необходимо построить на комплексной плоскости АФЧХ устойчивой разомкнутой системы.

Пусть СУ представлена ПИ-регулятором с зависимыми настройками:

$$W_r = Kp + \frac{Kp}{Tiz \cdot p}, \quad (4)$$

$$-T_1^1 \cdot Tiz \cdot \omega^2. \quad (11)$$

а в качестве объекта – звеном второго порядка:

$$W_0 = \frac{Ko}{1 + T_1^1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2},$$

где Ko, T_1^1, T_2^2 - параметры модели объекта; Kp, Tiz - настройки регулятора.

Передаточная функция разомкнутой системы управления будет:

$$W_{rs} = \frac{Ko \cdot \left(Kp + \frac{Kp}{Tiz \cdot p} \right)}{1 + T_1^1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2}. \quad (5)$$

После нормализации:

$$W_{rs} = \frac{Ko \cdot Kp \cdot (Tiz \cdot p + 1)}{(1 + T_1^1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2) \cdot Tiz \cdot p}. \quad (6)$$

Знаменатель передаточной функции разомкнутой СУ:

$$(1 + T_1^1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2) \cdot Tiz \cdot p. \quad (7)$$

Получим характеристический полином разомкнутой СУ:

$$T_2^2 \cdot Tiz \cdot p^3 + T_1^1 \cdot Tiz \cdot p^2 + Tiz \cdot p. \quad (8)$$

Используем преобразование Фурье:

$$p = j \cdot \omega. \quad (9)$$

Характеристический полином после преобразования:

$$-T_2^2 \cdot Tiz \cdot \omega^3 \cdot j - T_1^1 \cdot Tiz \cdot \omega^2 + Tiz \cdot \omega \cdot j. \quad (10)$$

Действительная часть (Re):

$$W(j \cdot \omega) = \frac{B_R + j \cdot B_Q}{A_R + j \cdot A_Q}, \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} B_R &= b_0 - b_2 \cdot \omega^2 + b_4 \cdot \omega^4 - b_6 \cdot \omega^6 + \dots = b_0 - \omega^2 \cdot (b_2 - \omega^2 \cdot (b_4 - \dots)) \dots; \\ B_Q &= b_1 \cdot \omega - b_3 \cdot \omega^3 + b_5 \cdot \omega^5 - b_7 \cdot \omega^7 + \dots = \omega \cdot (b_1 - \omega^2 \cdot (b_3 - \omega^2 \cdot (b_5 - \dots)) \dots); \\ A_R &= a_0 - \omega^2 \cdot (a_2 - \omega^2 \cdot (a_4 - \omega^2 \cdot (a_6 - \dots))) \dots; \\ A_Q &= \omega \cdot (a_1 - \omega^2 \cdot (a_3 - \omega^2 \cdot (a_5 - \omega^2 \cdot (a_7 - \dots)))) \dots. \end{aligned} \quad (15)$$

Мнимая часть (Im):

$$-T_2^2 \cdot Tiz \cdot \omega^3 \cdot j + Tiz \cdot \omega \cdot j. \quad (12)$$

Запас устойчивости удобно определять непосредственно по степени удаления амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) от «опасной» точки $(-1; j0)$. В этом случае запас устойчивости определяется двумя числовыми величинами: запасом устойчивости по модулю и запасом устойчивости по фазе.

Чтобы система считалась работоспособной, необходимо, чтобы ее запас по модулю и по фазе был не меньше некоторых ранее заданных величин. Как правило, при расчете запаса устойчивости выдвигается требование, которое заключается в том, чтобы АФХ системы не только не охватывала точку с координатами $(-1; j0)$, но и не заходила внутрь «запретной области», окружающей эту «опасную» точку. Радиус этой области характеризуется коэффициентом M , называемым коэффициентом колебательности.

Обычно считается, что СУ обладает необходимым запасом устойчивости, если ее показатель колебательности не превышает величины $M=1,1 \div 1,6$.

Рассчитаем показатель колебательности с использованием схемы Горнера [7].

В общем случае передаточная функция СУ имеет вид:

$$W(p) = \frac{b_m \cdot p^m + b_{m-1} \cdot p^{m-1} + \dots + b_1 \cdot p + b_0}{a_n \cdot p^n + a_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + a_1 \cdot p + a_0}. \quad (13)$$

Подставляя в передаточную функцию (12) $p = j \cdot \omega$, получим:

Анализ полученных зависимостей (13)-(15) показывает, что вычисление мнимых и вещественных частей числителя и знаменателя может быть проведено по однотипной схеме (схеме Горнера).

Для расчёта частотных характеристик выражение (14) приведём к виду:

$$W(j \cdot \omega) = P(\omega) + j \cdot Q(\omega), \quad (16)$$

$$\text{где } P(\omega) = \frac{A_R \cdot B_R + A_Q \cdot B_Q}{A_R^2 + A_Q^2}; \quad (17)$$

$$Q(\omega) = \frac{A_R \cdot B_Q - A_Q \cdot B_R}{A_R^2 + A_Q^2}; \quad (18)$$

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}. \quad (19)$$

Полный алгоритм расчёта вещественной, мнимой и амплитудной частотных характеристик состоит в реализации формул (15)-(19).

Зависимость для вычисления фазовой частотной характеристики имеет вид:

При подстановке параметров модели объекта и настроек регулятора:

$$W_{zs}(s) = \frac{Ko \cdot Kp \cdot Tiz \cdot s + Ko \cdot Kp}{T_2^2 \cdot Tiz \cdot s^3 + T_1^1 \cdot Tiz \cdot s^2 + s \cdot (Tiz \cdot Ko \cdot Kp + Tiz) + Ko \cdot Kp}. \quad (24)$$

Коэффициенты для расчета по схеме Горнера будут иметь вид:

$$\begin{aligned} b1_ &= Ko \cdot Kp \cdot Tiz; \\ b0_ &= Ko \cdot Kp; \\ a3_ &= T_2^2 \cdot Tiz; \\ a2_ &= T_1^1 \cdot Tiz; \\ a1_ &= Tiz \cdot Ko \cdot Kp + Tiz; \\ a0_ &= Ko \cdot Kp; \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} B_R &= b0_; \\ B_Q &= b1_ \cdot \omega; \\ A_R &= a0_ - \omega^2 \cdot a2_; \\ A_Q &= a1_ \cdot \omega - a3_ \cdot \omega^3. \end{aligned}$$

Показатель колебательности М определяется как

$$M = \frac{A \max(\omega)}{A(0)}. \quad (26)$$

Радиус «запретной области»:

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (20)$$

Однако вычисление фазовой характеристики удобнее выполнять по формуле:

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{B_Q}{B_R} - \text{arctg} \frac{A_Q}{A_R}. \quad (21)$$

Рассмотрим исходную СУ (4), включающую объект и ПИ-регулятор с зависимыми настройками. Передаточная функция разомкнутой системы:

$$Wrs(s) = Wo(s) \cdot Wr(s). \quad (22)$$

Передаточная функция замкнутой системы:

$$Wzs(s) = \frac{Wrs(s)}{1 + Wrs(s)}. \quad (23)$$

$$r = \frac{M}{M^2 - 1}. \quad (27)$$

Центр «запретной области» располагается на вещественной полуоси на расстоянии R0 от начала координат:

$$R0 = \frac{M^2}{M^2 - 1}. \quad (28)$$

Запас устойчивости по модулю определяется как

$$c = \frac{M - 1}{M^2 - 1}. \quad (29)$$

Запас устойчивости по фазе определяется как

$$\gamma = \arccos \left(1 - \frac{1}{2 \cdot M} \right). \quad (30)$$

Зададимся следующими параметрами СУ: Ko=0.5; T₁¹=3.5; T₂²=2.2; Kp=0.05;

$Tiz=0.1$, соответствующими модели объекта второго порядка и ПИ-регулятору.

Годограф Найквиста в комплексной плоскости будет иметь вид (рис. 2).

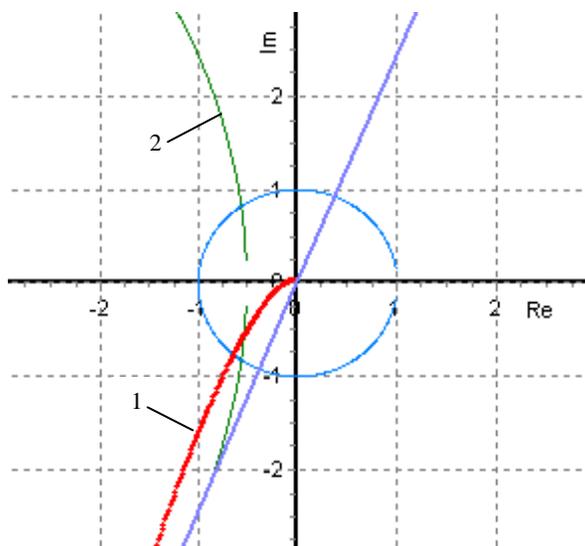


Рис. 2. Годограф системы (линия 1), не обладающей необходимым запасом устойчивости (пересекает «запретную область» - линия 2)

По вышеприведенному определению устойчивости замкнутая система будет устойчива, т.к. годограф не охватывает точку $(-1; j0)$. Однако она не обладает необходимым запасом устойчивости, т.к. годограф входит в «запретную область» (пересекает окружность – линия 2).

Выполним переход от непрерывного описания СУ (31), (32) к дискретной форме записи – уравнения (1), (2).

$$u(t) = Kp \cdot \left(e(t) + \frac{1}{Tiz} \cdot \int_0^t e(t) dt \right); \quad (31)$$

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1^1 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = Ko \cdot u(t). \quad (32)$$

Для этого используем полученные формулы взаимного пересчета параметров непрерывных и дискретных моделей ПИ-регулятора и объекта второго порядка [3, 5]:

$$\begin{aligned} q_0 &= Kp; \\ q_1 &= -Kp \cdot \left(1 - \frac{T_0}{Tiz} \right); \\ a_1 &= \frac{2 \cdot T_2^2 + T_1^1 \cdot T_0 - T_0^2}{T_2^2 + T_1^1 \cdot T_0}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 &= -\frac{T_2^2}{T_2^2 + T_1^1 \cdot T_0}; \\ b &= \frac{Ko \cdot T_0^2}{T_2^2 + T_1^1 \cdot T_0}. \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} Kp &= q_0; \\ Tiz &= \frac{q_0}{q_0 + q_1} \cdot T_0; \\ T_1^1 &= \frac{(1 + a_2) \cdot T_0}{1 - a_1 - a_2}; \\ T_2^2 &= -\frac{a_2 \cdot T_0^2}{1 - a_1 - a_2}; \\ Ko &= \frac{b}{1 - a_1 - a_2}. \end{aligned}$$

Рассчитаем динамическую характеристику замкнутой цифровой системы управления (ЦСУ) (рис. 3).

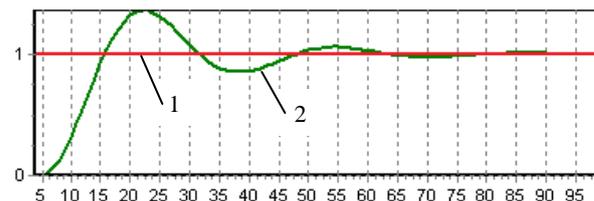


Рис. 3. Динамическая характеристика системы, не обладающей необходимым запасом устойчивости: линия 1 – задающее воздействие; линия 2 – регулируемый параметр

По характеристике видно, что регулируемый параметр выходит на задание, но его изменение носит колебательный характер с большим перерегулированием (до 20 % от задающего воздействия).

При уменьшении настройки регулятора Kp происходит увеличение запаса устойчивости системы и при достижении значения $Kp=0.035$ годограф выходит из «запретной зоны» (рис. 4, 5).

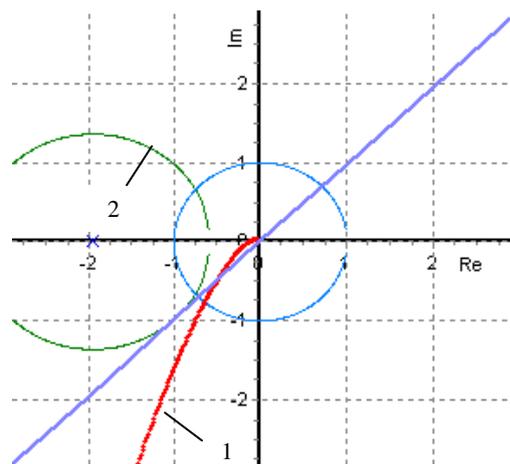


Рис. 4. Годограф системы (линия 1), обладающей необходимым запасом устойчивости (не пересекает «запретную область» - линия 2)

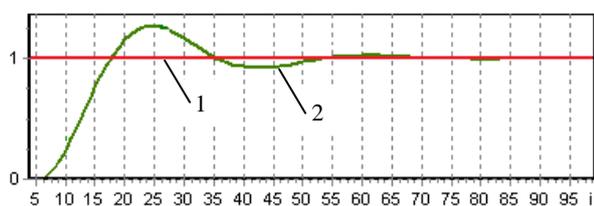


Рис. 5. Динамическая характеристика системы, обладающей необходимым запасом устойчивости: линия 1 – задающее воздействие; линия 2 – регулируемый параметр

Для системы, обладающей необходимым запасом устойчивости, также построим полученную амплитудную характеристику (рис. 6).

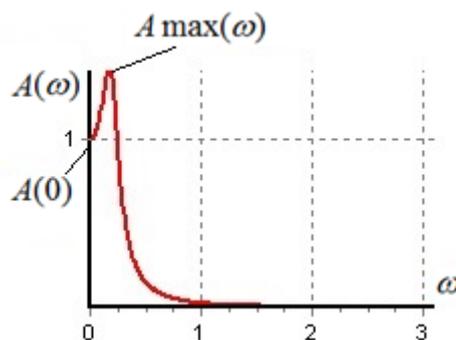


Рис. 6. Амплитудная характеристика системы, обладающей необходимым запасом устойчивости

Получены следующие результаты вычислений (таблица).

Значения показателей для системы, обладающей необходимым запасом устойчивости

Показатель колебательности M	1.201126
Радиус «запретной области» r	2.713161
Расстояние от (0;0) RO	3.258848
Запас устойчивости по модулю c	0.454313
Запас устойчивости по фазе γ	54.287109

Разработана программа в среде Borland C++ Builder для исследования СУ с различными параметрами, в которой предусмотрена оценка критерия Найквиста, построение годографа системы и амплитудной характеристики (рис. 7) [7].

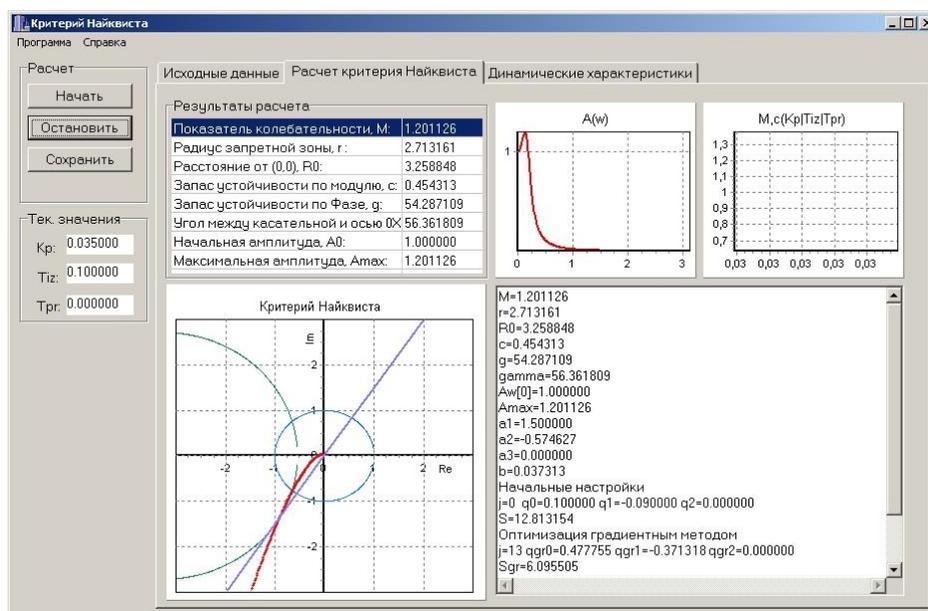


Рис. 7. Главное окно программы «Критерий Найквиста»

Описание усовершенствованной адаптивной системы и программного комплекса для ее реализации

Разработанная методика оценки запаса устойчивости по критерию Найквиста в связке с исследованием динамической характеристики системы, вычисляемой по дискретным моделям (1), (2), при изменении ее параметров позволяет провести синтез АЦСУ с заданным запасом устойчивости (рис. 8).

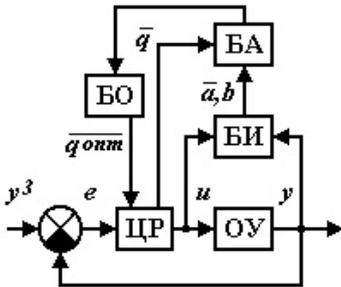


Рис. 8. Структурная схема АЦСУ с заданным запасом устойчивости:

БА – блок анализа; \bar{q} - текущие настройки ЦР

В блок анализа БА поступают текущие параметры настраиваемой с помощью РМНК дискретной модели ОУ \bar{a}, \bar{b} (2) и текущие настройки цифрового регулятора ЦР \bar{q} (1). Выполняется переход от дискретного к непре-

рывному описанию СУ (по формулам взаимного пересчета параметров непрерывных и дискретных моделей (33)) [3,5]. Проводится оценка запаса устойчивости системы по критерию Найквиста. При снижении запаса устойчивости в блоке оптимизации (БО) выполняется расчет оптимальных настроек \bar{q}^{opt} (градиентным методом оптимизации), которые передаются в ЦР для расчета управляющего воздействия u_i на последующих тактах.

Такая структура АЦСУ (рис. 8) позволяет не только определять момент подстройки (оптимизации) настроек \bar{q} цифрового регулятора в системе, но и поддерживать заданный запас устойчивости, что особенно актуально для нестационарных технологических объектов с «жесткими» требованиями по качеству управления.

Обработка алгоритма функционирования АЦСУ с заданным запасом устойчивости в режиме реального времени выполнена путем машинного эксперимента в SCADA Trace Mode [8]. Разработан проект с использованием динамических библиотек и элементов ActiveX, написанных на C++. Проект состоит из трех частей: обучение АЦСУ; текущая адаптация параметров СУ; контроль устойчивости и запаса устойчивости в системе (рис. 9).

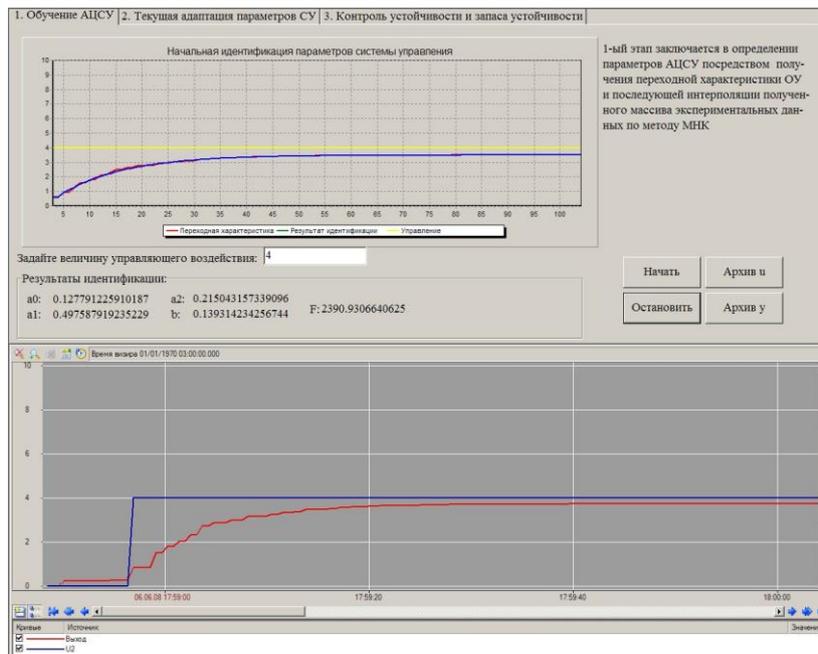


Рис. 9. Главное окно программы Trace Mode: этап обучения АЦСУ (процедура идентификации)

Выводы

Результаты выполненной работы следующие.

1. Проведено исследование СУ, представленной ПИ-регулятором и моделью объекта 2-го порядка, на устойчивость по критерию Найквиста (запас устойчивости по модулю и по фазе). Установлена связь между запасом устойчивости и формой динамической характеристики замкнутой системы.

2. Выполнен синтез АЦСУ с заданным запасом устойчивости (рис. 8), отличающейся от типовой схемы включением блока анализа БА, который позволяет оценить запас устойчивости по критерию Найквиста (при дрейфе параметров системы) и определить момент для оптимизации настроек регулятора.

3. Разработано математическое и программное обеспечение для исследования устойчивости СУ (с применением полученных формул параметрической взаимосвязи непрерывного и дискретного описания систем), а также для реализации АЦСУ в режиме реального времени. Проведенные исследования с различными параметрами моделей ОУ показали эффективность предлагаемой АЦСУ с заданным запасом устойчивости.

Литература

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. СПб.: Профессия, 2009. 592 с.
2. Синтез цифровых систем управления технологическими объектами / В.С. Кудряшов, В.К. Битюков, М.В. Алексеев, С.В. Рязанцев. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2005. 336 с.
3. Кудряшов В.С., Алексеев М.В. Моделирование систем. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т инж. технол., 2012. 208 с.
4. Алексеев М.В., Друккер К.Ю. Исследование качества адаптации дискретных динамических моделей РМНК // Моделирование энергоинформационных процессов: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. интернет-конф. Воронеж: ВГУИТ, 2017. С. 103-106.
5. Битюков В.К., Кудряшов В.С., Алексеев М.В. Моделирование и синтез систем цифрового управления многомерными технологическими объектами непрерывного действия: монография. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2002. 143 с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 751 с.
7. Адаптивная цифровая система регулирования с заданным запасом устойчивости / В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, И.А. Александров, А.Н. Докучаев // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. Секции 12,13. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. Т. 6. С. 213-214.
8. Алексеев М.В., Полесская И.Н. Разработка пользовательских FBD-блоков для реализации алгоритмов цифрового управления в среде Trace Mode // Технические науки: материалы студенческой науч. конф. Воронеж: ВГУИТ, 2015. Ч. 1. С. 344.

Поступила 25.03.2019; принята к публикации 03.06.2019

Информация об авторах

Кудряшов Владимир Сергеевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: kudryashovvs@mail.ru, тел. 8-920-446-92-63

Алексеев Михаил Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: mwa1976@mail.ru, тел. 8-950-752-42-86

Иванов Андрей Валентинович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных и управляющих систем, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19), e-mail: andrious@rambler.ru, тел. 8-920-402-49-99

Орловцева Ольга Александровна – канд. техн. наук, директор офиса коммерциализации инновационных проектов и разработок, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: starosta1981@inbox.ru, тел. 8-910-247-14-09

Иванова Ирина Викторовна – магистрант, инженер-проектировщик, ООО НПФ «Компьютерные сети» (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 97), e-mail: irina-20031987@yandex.ru, тел. 8-903-855-73-97

SYNTHESIS OF ADAPTIVE DIGITAL CONTROL SYSTEM WITH A SPECIFIED STABILITY RESOURCE

V.S. Kudryashov¹, M.V. Alekseev¹, A.V. Ivanov¹, O.A. Orlovitseva², I.V. Ivanova³

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³LLC RPC «Computer Network», Voronezh, Russia

Abstract: the article is devoted to solving the problem of developing an adaptive digital system that can be used to control various technological processes. The analysis of a typical adaptive digital control system with a custom model in which the optimization of the digital controller settings is performed at each quantization step according to an adaptable model of the object is carried out, which significantly increases the computational load on the system. It is proposed to optimize the settings of the digital controller only when reducing the stability margin of the system. For this purpose, a mathematical and software analysis of the stability of the Nyquist criterion for the drift of system parameters was developed. A connection was established between the «forbidden area», which characterizes the stability margin, and the dynamic characteristic of a closed control system. An adaptive digital control system was synthesized with a predetermined stability margin different from a typical adaptive system by including an analysis unit that allows estimating the stability margin by the Nyquist criterion and determining the moment to optimize the digital controller settings. In this case, the sustainability margin is set according to the requirements of a particular technological process. The conducted studies with various parameters of the control object models showed the effectiveness of the proposed adaptive digital system

Key words: adaptive system, object model, digital controller, sustainability margin

References

1. Kharazov V.G. "Integrated control systems of technological processes" ("Integrirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami"), St. Petersburg, Professiya, 2009, 592 p.
2. Kudryashov V.S., Bityukov V.K., Alekseev M.V., Ryazantsev S.V. "Synthesis of digital control systems of technological objects" ("Sintez tsifrovyykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami"), Voronezh State Technological Academy, 2005, 336 p.
3. Kudryashov V.S., Alekseev M.V. "System modeling" ("Modelirovanie sistem"), Voronezh State University of Engineering Technology, 2012, 208 p.
4. Alekseev M.V., Drucker K.Yu. "Investigation of the quality of adaptation of discrete dynamic models RLSM", *Proc. of VI International Scientific Practical Internet Conf.: Modeling Energy-Information Processes (Modelirovanie energoinformatsionnykh protsessov: sb. materialov VI Mezhdunar. nauch.-prakt. internet-konf.)*, Voronezh, VSUET, 2017, pp. 103-106.
5. Bityukov V.K., Kudryashov V.S., Alekseev M.V. "Modeling and synthesis of digital control systems for multidimensional technological objects of continuous action: monograph" ("Modelirovanie i sintez sistem tsifrovogo upravleniya mnogomernymi tekhnologicheskimi ob"ektami nepreryvnogo deystviya: monografiya"), Voronezh State Technological Academy, 2002, 143 p.
6. Besekerskiy V.A., Popov E.P. "Theory of automatic control systems" ("Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya"), St. Petersburg, Professiya, 2003, 751 p.
7. Kudryashov V.S., Alekseev M.V., Aleksandrov I.A., Dokuchaev A.N. "Adaptive digital control system with a given stability margin", *Proc. of the XXI International. Scientific Conf.: Mathematical Methods in Techniques and Technology MMTT-21 (Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh MMTT-21: sb. tr. XXI Mezhdunar. nauch. konf.)*, Saratov, 2008, vol. 6, pp. 213-214.
8. Alekseev M.V., Polesskaya I.N. "Development of custom FBD blocks for the implementation of digital control algorithms in the Trace Mode environment", *Materials of the Student's Scientific Conference: Technical Sciences (Tekhnicheskie nauki: materialy studencheskoy nauch. konf.)*, Voronezh, VSUET, 2015, part 1, pp. 344.

Submitted 25.03.2019; revised 03.06.2019

Information about the authors

Vladimir S. Kudryashov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: kudryashovvs@mail.ru, tel.: 8-920-446-92-63

Mikhail V. Alekseev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: mwa1976@mail.ru, tel.: 8-950-752-42-86

Andrey V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19 Revolutsii Avenu, Voronezh 394036, Russia), e-mail: andrious@rambler.ru, tel.: 8-920-402-49-99

Ol'ga A. Orlovtsava, Cand. Sc. (Technical), Director of the Office for the Commercialization of Innovative Projects and Developments, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: starosta1981@inbox.ru, tel.: 8-910-247-14-09

Irina V. Ivanova, MA, design engineer, LLC RPC «Computer Network» (97 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: irina-20031987@yandex.ru, tel.: 8-903-855-73-97

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИБКОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СБОРОЧНО-МОНТАЖНОГО ЦЕХА

Д.П. Лашенов, В.Л. Бурковский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрено имитационное моделирование гибких производственных систем на основе математического аппарата теории массового обслуживания (ТМО). Важнейшей спецификой данных систем является их нестационарная гибкая структура, обеспечивающая высокую степень адаптации к изменяющимся внешним и внутренним параметрам технологических объектов и позволяющая производить широкую номенклатуру наукоемкой продукции при непрерывном процессе ее обновления и усовершенствования конструкции. Современная инструментальная среда имитационного моделирования AnyLogic дает широкие возможности для максимально полноценной реализации подобных моделей, позволяет наглядно структурировать модель производственной системы, задать все необходимые параметры, ограничения и требования для того, чтобы провести анализ работы системы и сформировать оптимальный набор параметров для решения поставленных задач. Рассматривается пример реализации имитационной модели производства блоков электрических приводов на базе гибкой производственной системы сборочно-монтажного цеха. Структура модели представляет собой многофазную многоканальную систему массового обслуживания (СМО). Приведены подробное описание состава модели, назначение и характеристики ее составных элементов. На основе заданных требований и исходных данных модели составлена оптимизационная задача. Представлены результаты проведения оптимизационного эксперимента с последующим запуском модели с полученными оптимальными параметрами

Ключевые слова: имитационное моделирование, математическая модель, гибкая производственная система, технологический процесс, оптимизация, система массового обслуживания, инструментальная среда AnyLogic

Введение

В настоящее время во многих промышленных отраслях мировой экономики происходит активное развитие и внедрение концепции «бережливого производства». Данный подход подразумевает переход от массового крупносерийного производства продукции, имеющей строго заданную номенклатуру, к созданию адаптивных/реконфигурируемых производственных систем с высоким уровнем приспособляемости (гибкости структуры и компоновки) к изменяющемуся рыночному спросу, позволяющих изготавливать широкую гамму сложной технической продукции с постоянно обновляемым модельным рядом [1]. Данная концепция особенно актуальна для производства сложной наукоемкой продукции, изготавливаемой по специальным заказам.

Высокая адаптивная способность производственных систем обеспечивается регулированием параметров и структуры технологических объектов в соответствии с происходящими изменениями конфигурации и номенклатуры выпускаемой продукции.

Для достижения максимальной эффективности гибких производственных систем необходимо создание интегрированных систем

управления на базе единой информационной среды, одним из главных компонентов которой является имитационное моделирование технологических процессов. Практическая реализация имитационной модели производственной системы включает в себя создание структурной схемы, состоящей из блоков, имитирующих реальные технологические объекты, имеющих определенные настраиваемые параметры, и построенных между ними связей согласно технологическим маршрутам изготовления деталей. Имитационная модель позволяет производить многократные экспериментальные запуски моделируемой производственной системы в любом временном масштабе с варьированием параметров технологических объектов в заданных пределах, при этом есть возможность задания динамически меняющейся номенклатуры продукции и внешних факторов. Данные исследования позволяют проводить объективный анализ функционирования производственной системы и прогнозирование ее работы в последующие временные интервалы. На основе производимых имитационных экспериментов осуществляется поиск оптимальной конфигурации технологической системы, обеспечивающей выполнение заданных критериев с наибольшей экономической эффективностью в максимально короткие сроки [2].

Высокой степенью адекватности характеризуются имитационные модели, построенные на базе аппарата теории массового обслуживания. На сегодняшний день одной из наиболее актуальных компьютерных систем имитационного моделирования, основанных на данной теории, является инструментальная среда AnyLogic [3]. В качестве примера практической реализации данной системы будет рассмотрена имитационная модель гибкой производственной системы сборочно-монтажного цеха.

Структура и описание имитационной модели

Рассматриваемая производственная система сборочно-монтажного цеха включает в себя следующие рабочие ресурсы: 10 сборочных роботов, 28 слесарей-сборщиков, 8 модулей автоматического монтажа, 36 монтажников

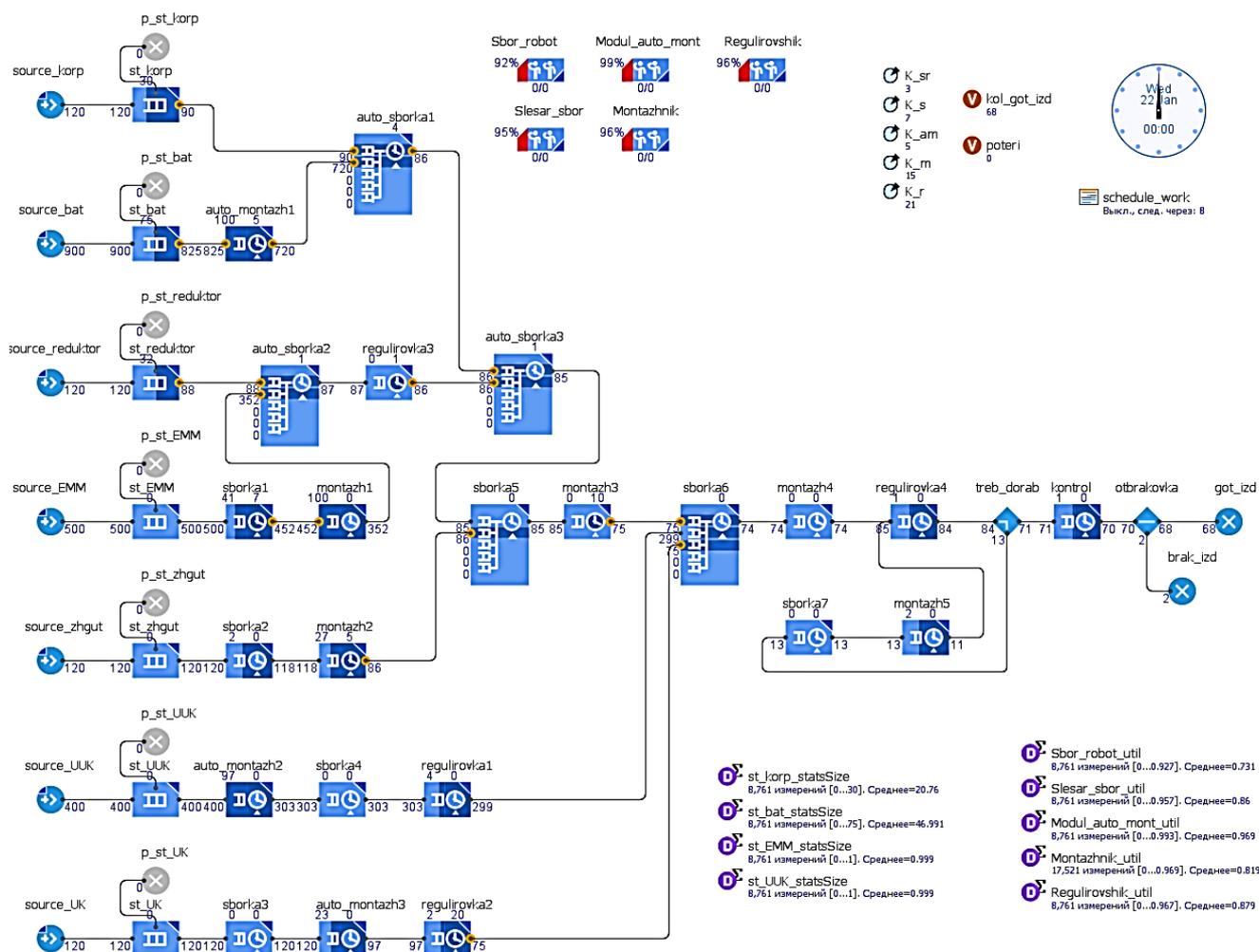
РЭАиП, 28 регулировщиков РЭАиП. Данные ресурсы сгруппированы по участкам в соответствии с типом выполняемой работы, при этом технологическое оборудование участков обеспечивает гибкую структуру, позволяющую оперативно изменять режимы работы и технологические маршруты изготовления продукции.

Сборочно-монтажный цех получил заказ на серийное изготовление блоков электрических приводов (БЭП). Необходимый объем производства составляет 60 изделий в год. Маршрутная карта изготовления данного изделия представлена в табл. 1. Структурная схема имитационной модели в AnyLogic приведена на рисунке. В основу модели положено формализованное описание ТО как многоканальной многофазной системы массового обслуживания (СМО) [4].

Таблица 1

Маршрутная карта изготовления блока электрических приводов

Операция	Сборочные единицы		Наименование блока	Рабочие ресурсы		Время выполнения операции, ч		
	Наименование	Кол-во		Вид ресурса	Кол-во	T _{min}	T _{max}	T _{mode}
Монтаж панелей батарей	Батарея	1	auto_montazh1	Модуль авт. монтажа	1	1	3	2
Установка батарей в корпус	Корпус	1	auto_sborka1	Сборочный робот	1	4	8	6
	Батарея	8						
Сборка жгута ЭММ	ЭММ	1	sborka1	Слесарь-сборщик	1	6	10	8
Монтаж жгута ЭММ			montazh1	Монтажник	1	5	8	7
Сборка ЭММ	ЭММ	1	auto_sborka2	Сборочный робот	1	4	8	6
	Редуктор	1						
Регулировка ЭММ	ЭММ	1	regulirovka3	Регулировщик	1	2	4	2
Установка ЭММ в корпус	Корпус	1	auto_sborka3	Сборочный робот	2	4	8	6
	ЭММ	4						
Сборка жгута БЭП	Жгут	1	sborka2	Слесарь-сборщик	1	4	8	6
Монтаж жгута БЭП			montazh2	Монтажник	1	1	2	1,5
Установка жгута в корпус	Корпус	1	sborka5	Слесарь-сборщик	1	4	9	5
	Жгут	1						
Монтаж жгута в корпусе	Корпус	1	montazh3	Монтажник	1	12	17	15
Монтаж панелей УУК	УУК	1	auto_montazh2	Модуль авт. монтажа	1	6	10	8
Установка радиаторов инвертора УУК			sborka4	Слесарь-сборщик	1	2	4	3
Регулировка УУК			regulirovka1	Регулировщик	1	2	4	2
Установка модулей питания УК	УК	1	sborka3	Слесарь-сборщик	1	1	2	1,5
Монтаж панелей УК			auto_montazh3	Модуль авт. монтажа	1	3	5	4
Регулировка УК			regulirovka2	Регулировщик	1	0,5	1,5	1
Установка УК и УУК в корпус	Корпус	1	sborka6	Слесарь-сборщик	2	5	9	7
	УУК	4						
	УК	1						
Финишный монтаж БЭП	БЭП	1	montazh4	Монтажник	1	4	8	6
Проверка и регулировка БЭП			regulirovka4	Регулировщик	2	30	40	36
Слесарная доработка БЭП			sborka7	Слесарь-сборщик	1	0,5	2	1,5
Монтажная доработка БЭП			montazh5	Монтажник	1	0,5	2	1,5
Приемо-сдаточные испытания			kontrol	Регулировщик	1	8	16	12



Структурная схема имитационной модели производственной системы

Каждый изготавливаемый образец блока электрических приводов состоит из следующих комплектующих: корпус – 1 шт., батареи с монтируемыми панелями – 8 шт., электромеханические модули (ЭММ) – 4 шт., жгут БЭП – 1 шт., узлы управления каналом (УУК) – 4 шт., узел контроля (УК) – 1шт.

Блоки модели source_korp, source_bat, source_reduktor, source_EMM, source_zhgut, source_UUK, source_UK имитируют поступление соответствующих составных частей изделия в качестве заявок на обслуживание с определенной интенсивностью.

Блоки типа «Queue» с именами st_korp, st_bat, st_reduktor, st_EMM, st_zhgut, st_UUK, st_UK моделируют стеллажи (накопители) для хранения деталей и сборочных единиц (ДСЕ) изделия. Значения максимальной вместимости стеллажей представлены в табл. 2. Поскольку стеллажи имеют ограниченную емкость, в случае переполнения накопителей заявки уничтожаются блоками «Sink» p_st_korp, p_st_bat,

p_st_reduktor, p_st_EMM, p_st_zhgut, p_st_UUK, p_st_UK.

Таблица 2

Максимальные емкости накопителей

Наименование накопителя	Максимальная емкость
st_korp	50
st_bat	200
st_reduktor	100
st_EMM	100
st_zhgut	50
st_UUK	100
st_UK	50

Выполнение производственных операций (обслуживание заявок) осуществляют блоки типа «Service» и «Assembler» с именами sborka1 – sborka7; montazh1 – montazh6; auto_sborka1 – auto_sborka3; auto_montazh1 – auto_montazh3; regulirovka1 – regulirovka4; kontrol. Описание выполняемой операции, вид и количество задействуемых ресурсов, а также время выполнения работы каждого блока приведены в табл. 1. Поскольку в реальных усло-

виях время выполнения операции есть величина непостоянная и имеющая вероятностный характер, при моделировании времени обслуживания использована треугольная функция распределения «triangular» с параметрами: T_{\min} – минимальное время; T_{\max} – максимальное время; T_{mode} – наиболее вероятное время.

Ввиду достаточной сложности изделия и высоких технических требований к его качеству на этапе проверки и регулировки БЭП предусмотрена дополнительная сборочно-монтажная доработка. Разветвление маршрута для выполнения доработки реализовано с помощью блока типа «SelectOutput» с названием `treb_dorab`, в котором необходимость доработки задана с вероятностью 0,2.

На этапе приемо-сдаточных испытаний происходит финишная отбраковка готовых изделий. Вероятность появления на выходе продукции с браком задана блоком `otbrakovka` и составляет 0,05. Заявки, выполняющие роль забракованных изделий, уничтожаются блоком «Sink» `brak_izd`. Конечным элементом технологической цепочки в данной модели является блок `got_izd`, в который поступают обслуженные заявки – готовые изделия.

Производственные ресурсы, задействуемые при выполнении операций, заданы с помощью элементов «ResourcePool» с названиями `Sbor_robot`, `Slesar_sbor`, `Modul_auto_mont`, `Montazhnik`, `Regulirovshik`. Количество ресурсов каждого вида в конкретный момент времени определяется в соответствии с расписанием доступности «schedule_work» и значениями параметров k_{sr} , k_s , k_{am} , k_m , k_r . Расписание доступности составлено в соответствии с режимом работы цеха: Пн – Пт с 8:00 до 17:00, перерыв с 12:00 до 13:00.

Количество изготовленных изделий заносится в переменную `kol_got_izd`. Переменная `poteri` содержит в себе суммарное значение всех потерянных вследствие переполнения накопителей заявок.

Для анализа эффективности работы производственной системы использованы следующие блоки «Статистика»: `st_korp_StatsSize`, `st_bat_StatsSize`, `st_EMM_StatsSize`, `st_UUK_StatsSize` – статистика загрузки накопителей ДСЕ; `Sbor_robot_util`, `Slesar_sbor_util`, `Modul_auto_mont_util`, `Montazhnik_util`, `Regulirovshik_util` – статистика загрузки производственных ресурсов [5].

Исходя из поставленной задачи, при проведении имитационных экспериментов запуск

модели производится на период времени, равный 1 году.

Оптимизация производственной системы на основе имитационного моделирования

Для нахождения параметров рассматриваемой производственной системы, обеспечивающих максимальную эффективность ее работы при заданных экономических и плановых критериях, на имитационной модели в среде AnyLogic проведен оптимизационный эксперимент «Optimization». Формализованное математическое описание оптимизационной задачи представлено системой уравнений.

Целевой функцией здесь является суммарное количество задействованных производственных ресурсов, которое необходимо минимизировать. В качестве управляемых переменных выбраны значения количества ресурсов каждого вида: k_{sr} , k_s , k_{am} , k_m , k_r , заданных как параметры. Область допустимых решений задана требуемым годовым объемом производства 60 изделий, отсутствием потерь заявок вследствие переполнения накопителей и ограничением по количеству ресурсов, имеющихся в распоряжении цеха.

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{sr} + k_s + k_{am} + k_m + k_r \rightarrow \min \\ kol_got_izd \geq 60 \\ poteri = 0 \\ k_{sr} \leq 10 \\ k_s \leq 28 \\ k_{am} \leq 8 \\ k_m \leq 36 \\ k_r \leq 28 \end{array} \right.$$

В ходе проведения оптимизационного эксперимента было выполнено 3500 итераций. Наилучший результат был найден на 2231 итерации: $k_{sr} = 3$, $k_s = 7$, $k_{am} = 5$, $k_m = 15$, $k_r = 21$.

Для анализа функционирования производственной системы с полученными параметрами был проведен запуск имитационной модели. Данный эксперимент подтвердил адекватность результатов, полученных в ходе оптимизации. Количество изготовленных изделий составляет 68 шт. Потери заявок вследствие переполнения накопителей равны нулю, при этом средние значения загрузки стеллажей составляют: $k_{st_{korp}} = \frac{20.76}{50} = 0.415$, $k_{st_{bat}} = \frac{46.991}{200} = 0.235$, $k_{st_{EMM}} = \frac{0.999}{100} = 0.009$, $k_{st_{UUK}} = \frac{0.999}{100} = 0.009$.

О достаточно высокой эффективности производственной системы также свидетель-

ствуют средние значения коэффициентов загрузки производственных ресурсов: $Sbor_robot_util = 0.731$, $Slesar_sbor_util = 0.86$, $Modul_auto_mont_util = 0.969$, $Montazhnik_util = 0.819$, $Regulirovshik_util = 0.879$.

Заключение

1. В современных условиях предприятия, задействованные в изготовлении наукоемкой серийной продукции, производимой под заказ, должны иметь гибкую производственную структуру, обеспечивающую оперативную адаптацию к изменениям конструктивных параметров изделия и технологических процессов на любых этапах его изготовления.

2. Имитационное моделирование на базе математического аппарата теории массового обслуживания с применением инструментальной среды AnyLogic позволяет эффективно решать задачи проектирования гибких производственных систем, анализа их функционирования и поиска оптимальной структуры технологических объектов.

3. В данной работе представлена практическая реализация имитационной модели гибкой производственной системы на базе сборочно-монтажного цеха.

4. Исходные данные для моделирования взяты из маршрутной карты изготовления блока электрических приводов.

5. Для нахождения оптимальной структуры производственной системы, обеспечивающей максимально возможные показатели эффективности, проведен оптимизационный эксперимент, в котором задаются целевая функция, варьируемые параметры и ограничения.

6. Оптимизационный эксперимент позволил найти максимально выгодные параметры производственной системы, обеспечивающие выполнение годового плана по выпуску продукции с наименьшими материальными затратами и потерями.

Литература

1. Мизюн В.А. Интеллектуальное управление производственными системами и процессами: принципы организации и инструменты. Тольятти: СНЦ РАН, 2012. 214 с.
2. Вавилов А.А. Имитационное моделирование производственных систем. М.: Машиностроение, 1983. 416 с.
3. Хаймович И.Н., Фролов М.А., Куралесова Н.О. Совершенствование технологического процесса многоменклатурного производства на основе имитационного моделирования гибких производственных линий в цехе // Вестник ВУиТ. 2016. № 3. С. 208-213.
4. Лашенов Д.П., Бурковский В.Л. Имитационное моделирование технологических объектов интегрированных производственных систем // Современные технологии в науке и образовании. 2017. Т. 1. С. 38-42.
5. Куприяшкин А.Г. Основы моделирования систем. Норильск: НИИ, 2015. 135 с.

Поступила 22.04.2019; принята к публикации 10.06.2019

Информация об авторах

Лашенов Дмитрий Павлович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: nord_vrn@mail.ru

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

SIMULATION OF A FLEXIBLE PRODUCTION SYSTEM ON THE BASIS OF AN AUTOMATED ASSEMBLY SHOP

D.P. Lashchenov, V.L. Burkovskiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper is devoted to simulation modeling of flexible industrial systems based on the mathematical apparatus of the theory of mass service (TMS). The most important specificity of these systems is their non-stationary, flexible structure, providing a high degree of adaptation to changing external and internal parameters of technological objects and allowing one to produce a wide range of high-tech products with a continuous process of updating and improving the design. The modern tool environment of simulation modeling AnyLogic provides ample opportunities for the most complete implementation of such models and allows one to visually structure the model of the production system, set all the necessary parameters, restrictions and requirements in order to analyze the operation of the system and form the optimal set of parameters to solve the tasks. The article presents an example of the implementation of a simulation model for the production of electric drive units on the basis of a flexible production system of an assembly shop. The structure of the model is a multi-phase multi-channel queuing system (QS). The presented work contains a detailed description of the composition of the model, the purpose and characteristics of its

constituent elements. On the basis of the specified requirements and initial data of the model, an optimization task was compiled. The obtained results of the optimization experiment with the subsequent launch of the model with the obtained optimal parameters are presented

Key words: simulation, mathematical model, flexible production system, technological process, optimization, queuing system, development environment AnyLogic

References

1. Mizyun V.A. "Intellectual management of production systems and processes: principles of organization and tools" ("Intel'ktual'noe upravlenie proizvodstvennymi sistemami i protsessami: printsipy organizatsii i instrumenty"), Tol'yatti, SNTs RAN, 2012, 214 p.
2. Vavilov A.A. "Simulation of production systems" ("Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennykh sistem"), Moscow, Mashinostroenie, 1983, 416 p.
3. Khaymovich I.N., Frolov M.A., Kuralesova N.O. "Improving the technological process of multiproduct production on the basis of simulation modeling of flexible production lines in the workshop", *Bulletin of Tatishchev Volzhsk University (Vestnik VUiT)*, 2016, no. 3, pp. 208-213
4. Lashchenov D.P., Burkovskiy V.L. "Simulation of technological objects in integrated production systems", *Modern technologies in Science and Education (Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii)*, 2017, vol. 1, pp. 38-42
5. Kupriyashkin A.G. "Basics of system modeling" ("Osnovy modelirovaniya sistem"), Norilsk, NII, 2015, 135 p.

Submitted 22.04.2019; revised 10.06.2019

Information about the authors

Dmitriy P. Lashchenov, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: nord_vrn@mail.ru

Viktor L. Burkovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ НЕСВОЕВРЕМЕННОГО ЗАВЕРШЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗАЯВОК

С.А. Олейникова, К.Е. Киселев, И.А. Селищев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования в данной работе являются многостадийные системы со случайным временем выполнения отдельных работ. Предполагается, что процесс обслуживания заявки представляет собой выполнение множества последовательно-параллельных работ. Поскольку время обслуживания всей заявки является случайной величиной, предметом исследования является разработка математического аппарата, представляющего собой оценки вероятностей несвоевременного завершения обслуживания. Частично заданная задача уже была решена. В частности, был разработан метод Program Evaluation and Review Technic (PERT), позволяющий в том числе оценить закон распределения (с точностью до параметров) случайной величины, представляющей собой длительность обслуживания. Однако данный метод основан на предположениях, которые для реальных систем практически никогда не могут иметь место. В связи с этим возникает необходимость в проведении вычислительного эксперимента, позволяющего оценить точность существующих оценок, позволяющих определять вероятности несвоевременного обслуживания. В качестве исходных данных для эксперимента подаются взаимная зависимость и числовые характеристики работ, множеством которых задается заявка. На выходе получаем подтверждение или опровержение гипотезы о нормальном распределении выборки, каждый элемент которой описывает время выполнения всех работ. Результаты эксперимента свидетельствуют о необходимости получения более точных оценок для описания закона распределения соответствующей случайной величины

Ключевые слова: стохастические многостадийные системы, длительность обслуживания, PERT, функция распределения, плотность распределения, вычислительный эксперимент

Введение

Особенностью современных производственных и обслуживающих систем является точность, предъявляемая к составлению графика ее функционирования. Отклонение фактического времени начала работ от планового может повлечь целый ряд неблагоприятных последствий (штрафные санкции, ухудшение репутации компании и т.д.). В связи с этим практически значимой становится задача оценки рисков, связанных с несвоевременным обслуживанием поступающей заявки. Наличие эффективного математического аппарата позволит не только минимизировать риски, связанные с неблагоприятными ситуациями, но и иметь возможность составления более качественного расписания для последующих заявок с учетом наличия точной информации о занятости оборудования и специалистов.

Данная задача относится к классу задач сетевого планирования и управления (управления проектами). Среди методов ее решения можно выделить метод PERT, представляющий собой расчетные формулы расчета стохастических характеристик системы [1, 2].

Однако те предположения, на которых данный метод основывается, являются недостижимыми для реально функционирующих систем. В частности, предполагается, что количество работ, стоящих на так называемом критическом пути заявки, очень велико (в идеале, стремится к бесконечности). Более того, желательно, чтобы все работы имели одинаковые параметры распределения случайной величины, которая описывает длительность обслуживания. Очевидно, что на практике ни одно из этих требований выполняться не будет. В связи с этим можно утверждать, что расчетные формулы PERT будут обладать некоторой погрешностью. Для оценки величины этой погрешности и анализа качества метода целесообразно проведение вычислительного эксперимента, позволяющего для каждой конкретной заявки (с заданной структурой и зависимостью между ее отдельными работами) оценить погрешность расчетов.

Целью работы является проверка возможности использования нормального закона распределения для оценки длительности обслуживания заявки. Данная проверка проводится с помощью критериев согласия, которые применяются к выборочным значениям, полученным экспериментальным путем. На вход эксперимента подается граф, описывающий заявку, и

числовые характеристики его отдельных работ. На выходе получаем экспериментальное значение по выбранному критерию согласия, примененному для данных выборочных значений.

Постановка задачи и особенности существующих подходов к ее решению

Исследуется работа многостадийной стохастической системы, процесс обслуживания в которой представляет собой множество последовательно-параллельных работ. Каждая работа задается своей длительностью, которая является случайной величиной, и взаимной зависимостью (множеством предшествующих или последующих работ). Подробно такие системы проанализированы в [3]. Требуется оценить закон распределения (функцию или плотность распределения) случайной величины, описывающей длительность обслуживания заявки.

Среди методов решения данной задачи следует выделить метод PERT (Program Evaluation and Review Technic), который позволяет описать случайную величину ξ , характеризующую время завершения обслуживания заявки. Вероятность завершения проекта в срок определяется формулой [4]:

$$P(\xi < T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (1)$$

Здесь a и σ - параметры нормального закона распределения, представляющие собой математическое ожидание и дисперсию случайной величины ξ . Среди всех работ выделяются те, которые стоят на критическом пути (т.е. суммарное время выполнения которых определяет длительность обслуживания заявки). Тогда параметры a и σ рассчитываются следующим образом [4]:

$$a = M\xi = M\xi_1 + \dots + M\xi_k, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{D\xi} = \sqrt{D\xi_1 + \dots + D\xi_k}. \quad (3)$$

Здесь ξ_1, \dots, ξ_k - случайные величины, описывающие работы, которые стоят на критическом пути.

В частности, вероятность того, что длительность выполнения проекта будет лежать во временном интервале (a, b) , определяется формулой:

$$P(a < \xi < b) = \int_a^b f_\xi(t) dt = F_\xi(b) - F_\xi(a). \quad (4)$$

Вероятность несвоевременного завершения проекта будет определяться следующим образом:

$$P(\xi > T) = 1 - F_\xi(T). \quad (5)$$

В формулах (4) и (5) $f_\xi(t)$ - плотность распределения случайной величины, представляющей длительность обслуживания заявки; $F_\xi(t)$ - плотность распределения данной случайной величины.

Как видно из данных формул, закон распределения является ключевым при оценках вероятностей несвоевременного завершения обслуживания. В связи с этим, особую актуальность приобретает выбор данного закона. Нормальный закон распределения итоговой случайной величины выбран на основании центральной предельной теоремы. Она утверждает, что сумма бесконечно большого числа одинаково распределенных случайных величин распределена нормально [4]. Однако для существующих обслуживающих систем такие положения являются практически недостижимыми. Во-первых, число работ, стоящих на критическом пути, как правило, невелико (даже для больших систем, в основном, не более десяти). Во-вторых, каждая из выполняемых работ индивидуальна, и, следовательно, индивидуальные характеристики соответствующей случайной величины. В связи с этим возникает задача проверки случайной величины, описывающей длительность обслуживания заявки, на соответствие нормальному закону распределения.

Экспериментальная проверка закона распределения длительности обслуживания заявки

Проведем следующий вычислительный эксперимент. На вход будем подавать комплекс взаимно-зависимых задач с длительностями, определенными по закону бета; на выходе необходимо получить результаты проверки гипотезы о законе распределения случайной величины, описывающей длительность обслуживания заявки. Подадим на вход следующий сетевой график (рис. 1).

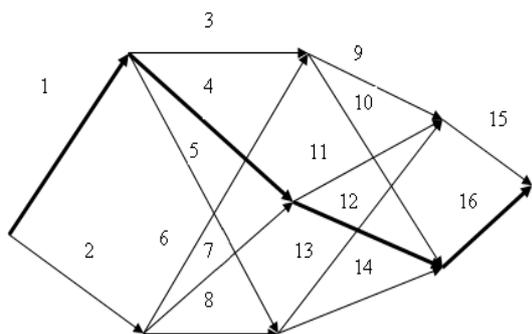


Рис. 1. Пример сетевого графика

Пусть временные характеристики работ приведенного проекта будут иметь следующие значения (табл. 1).

Таблица 1

Временные характеристики работ

Событие	№ работы	Работа	Длительность	Раннее начало	Позднее начало	Резерв
1	1	1-2	10	0	0	0
	2	1-3	9	0	4	4
2	3	2-4	12	10	15	5
	4	2-5	15	10	10	0
	5	2-6	10	10	13	3
3	6	3-4	14	9	13	4
	7	3-5	8	9	17	8
	8	3-6	7	9	16	7
4	9	4-7	9	23	32	9
	10	4-8	11	23	27	4
5	11	5-7	6	25	35	10
	12	5-8	13	25	25	0
6	13	6-7	16	20	25	5
	14	6-8	15	20	23	3
7	15	7-9	15	36	41	5
8	16	8-9	18	38	38	0

Здесь первые четыре столбца являются исходными данными; столбцы, описывающие раннее, позднее время начала работ и резерв, рассчитаны по известным формулам метода СРМ.

Сначала исследуем случай, когда характеристики работ близки к условиям центральной предельной теоремы.

Таблица 2

Временные характеристики работ

Работа	Мин.	Макс.	ожидание
1-2	9	11	10
1-3	8	10	9
2-4	11	13	12
2-5	14	16	15
2-6	9	11	10
3-4	13	15	14
3-5	7	9	8

Продолжение табл.2

3-6	6	8	7
4-7	8	10	9
4-8	10	12	11
5-7	5	7	6
5-8	12	14	13
6-7	15	17	16
6-8	14	16	15
7-9	14	16	15
8-9	17	19	18

Проверим гипотезу на нормальность распределения случайной величины, описывающей длительность обслуживания. Были использованы несколько критериев. Приведем примеры использования критерия χ^2 . Специфика этого критерия заключается в принятии гипотезы о законе распределения в случае, если экспериментальное значение итогового значения меньше критической величины, и отклонении гипотезы в противном случае. Экспериментальное значение определяется на основании выборочных значений по формуле:

$$G_{эксп} = \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (6)$$

Здесь n_i – количество выборочных значений, попавших в интервал i ; p_i – гипотетическая вероятность попадания в данный интервал (которая в данном случае основывается на предположении о нормальном распределении выборки); n – объем выборки.

Далее было сгенерировано несколько выборок, каждая из которых определяет определенную работу. Каждый элемент данной выборки i описывает длительность выполнения i -й работы. Он определяется путем генерирования случайной величины, имеющей распределение бета. Данный закон распределения имеет вид:

$$f_{\xi}(t) = \begin{cases} \frac{1}{B(p, q)(b-a)^{p+q-1}}(t-a)^{p-1}(b-t)^{q-1}, & a \leq t \leq b, \\ 0, & t < a, t > b. \end{cases} \quad (7)$$

Определение параметров p и q через математическое ожидание и дисперсию подробно описано в [5]. После этого определяется текущий элемент итоговой выборки на основании графа (для данного примера, представленного на рис. 1). Согласно критерию согласия χ^2 , экспериментальное значение в предположении о нормальном распределении выборки будет

16,523. При этом критическое значение равно 27.587.

Изменим теперь асимметрию лишь у двух работ, стоящих на критическом пути, а временные характеристики остальных работ оставим без изменения. При этом увеличим дисперсию вдвое.

Таблица 3

Исходные данные для эксперимента

События	Мин.	Макс.	Ожидание
1-2	9	13	10
1-3	7	11	9
2-4	10	14	12
2-5	13	17	15
2-6	8	12	10
3-4	12	16	14
3-5	6	10	8
3-6	5	9	7
4-7	7	11	9
4-8	9	13	11
5-7	4	8	6
5-8	11	15	13
6-7	14	18	16
6-8	13	17	15
7-9	13	17	15
8-9	17	21	18

Получим экспериментальное значение 71.617. Если при этом изменить асимметрию у четырех величин, стоящих на критическом пути, то экспериментальное значение итоговой величины составляет 240.59.

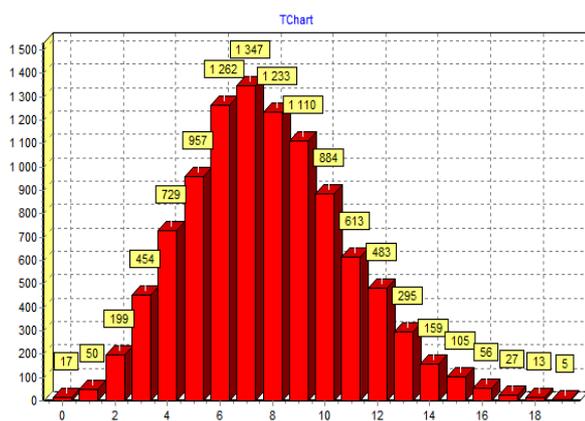


Рис. 2. Гистограмма полученной выборки

Кроме данного критерия для проверки гипотезы о законе распределения использовались критерий Колмогорова-Смирнова с поправкой Лиллиефорса, а также критерий Шапиро-Уилка, который является одним из наиболее мощных критериев проверки нормальности закона распределения [6]. Выводы, полученные с использованием данных критериев, по-

казывают в среднем одинаковые результаты. Кроме перечисленных выше методов, воспользуемся известным методом Пирсона, позволяющим осуществлять подбор закона распределения по экспериментальным данным. Для этого рассчитывается асимметрия и эксцесс распределения, а также вспомогательный показатель χ [6]:

$$\chi = \frac{A^2(E+3)^2}{4(4E-3A^2)(2E-3A^2-6)}. \quad (8)$$

Здесь А и Е – асимметрия и эксцесс распределения выборки. Если $\chi=0$, то данная кривая соответствует нормальному распределению; если $\chi<0$ – бета-распределению. Для описанного выше примера с характеристиками, представленными в табл. 2, получили значения показателя χ , равные -0,0098, что соответствует бета-распределению, но может также быть оценено и нормальным законом. При увеличении асимметрии (в частности, как это представлено в табл. 3) величина χ имеет отрицательный знак и растет по модулю, что говорит о целесообразности использования именно закона бета для оценки ее закона распределения.

Результаты экспериментального исследования

Представленный в предыдущей части пример, а также результаты многочисленных экспериментов позволяют сделать следующие выводы относительно закона распределения случайной величины, описывающей длительность обслуживания заявок в многостадийных системах. В случае если все работы, стоящие на критическом пути, имеют симметричный закон распределения и небольшую дисперсию, то случайную величину, как правило, можно описать с помощью нормального закона распределения. При увеличении дисперсии закон распределения уже не подчиняется нормальному закону распределения с точки зрения ряда критериев согласия. В случае же, если работы являются асимметричными, то отклонение экспериментального значения итоговой величины от критического значения крайне велико, что говорит о невозможности использования нормального закона в качестве предполагаемого распределения случайной величины.

Подбор кривых по экспериментальным данным позволил выдвинуть гипотезу о воз-

можном бета-распределении соответствующей случайной величины.

Выводы

Целью работы являлся анализ точности использования нормального закона распределения для оценки рисков несвоевременного завершения проекта. Для этого был проведен вычислительный эксперимент, позволяющий оценить правомерность использования нормального закона распределения для проекта, множество работ которого задано взаимной зависимостью, представленной тем или иным графом. Для проверки гипотез о законе распределения были использованы различные критерии согласия (χ^2 , Колмогорова-Смирнова и другие). В результате можно сделать следующие выводы.

1. Нормальный закон распределения целесообразно использовать для оценки рисков несвоевременного завершения проекта лишь в случае, если все его работы, стоящие на критическом пути, имеют симметричный закон распределения с относительно небольшой дисперсией.

2. В случае, когда дисперсия работ велика или, по меньшей мере, одна из работ, стоящих на критическом пути, имеет асимметричный закон распределения, гипотеза о нормальном распределении длительности проекта не подтверждается.

3. Исходя из данных эксперимента, использование нормального закона для оценки рисков несвоевременного завершения проекта нецелесообразно. Необходимо осуществить поиск такого закона распределения, который бы позволял принимать гипотезу о законе распределения для любых законов распределения длительностей отдельных работ (симметричных или асимметричных) и любых значений дисперсий. В качестве такого закона предлагается проверить закон бета.

Литература

1. Кофман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования. М.: Прогресс, 1968. 182 с.
2. Eric L. Demeulemeester, Willy S. Herroelen. Project Scheduling: A Research Handbook (International Series in Operations Research & Management Science) Hardcover. 30 Jun 2002. 684 p.
3. Golenko-Ginzburg D., Gonik A. Project planning and controlling by stochastic network models. Managing and Modeling Complex Projects, 17, 1997, pp. 21-43.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
5. Олейникова С.А. Вычислительный эксперимент для анализа закона распределения случайной величины, описывающей длительность проекта в задачах сетевого планирования и управления // Экономика и менеджмент систем управления. 2013. Т.9. № 3. С. 90-96.
6. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

Поступила 15.04.2019; принята к публикации 31.05.2019

Информация об авторах

Олейникова Светлана Александровна – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Киселев Константин Евгеньевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bedrrin11@gmail.com

Селищев Иван Алексеевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: selishchev@gmail.com

COMPUTATIONAL EXPERIMENT FOR RISK ASSESSMENT OF UNTIMELY COMPLETION OF APPLICATIONS SERVICE

S.A. Oleynikova, K.E. Kiselev, I.A. Selishchev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: multi-stage systems with random execution times of individual works are the object of research in this paper. It is assumed that the process of servicing the application is the execution of a set of series-parallel work. Since the service time of the entire application is a random variable, the subject of the research is the development of a mathematical apparatus, which is an estimate of the likelihood of late completion of the service. Partially assigned task has already been solved. In particular, the Program Evaluation and Review Technic (PERT) method was developed, which allows, among other things, esti-

mating the distribution law (up to parameters) of a random variable that represents the duration of the service. However, this method is based on assumptions that almost never can take place for real systems. In this connection, it is necessary to carry out a computational experiment, which makes it possible to evaluate the accuracy of existing estimates, which make it possible to determine the probabilities of untimely maintenance. As the initial data for the experiment, mutual dependence and numerical characteristics of the works, the set of which specifies the application, are submitted. At the output, we get confirmation or refutation of the hypothesis about the normal distribution of the sample, each element of which describes the time for all the work. The results of the experiment indicate the need to obtain more accurate estimates to describe the distribution law of the corresponding random variable

Key words: stochastic multi-stage systems, service time, PERT, distribution function, distribution density, numerical experiment

References

1. Kofman A, Debazey G. "Network planning methods" ("Setevye metody planirovaniya"), Moscow, Progress, 1968, 182 p.
2. Demeulemeester E. L., Herroelen W. S. "Project scheduling: a research handbook (International series in operations research & management science)", Hardcover, 30 Jun 2002, 684 p.
3. Golenko-Ginzburg D., Gonik A. "Project planning and controlling by stochastic network models", *Managing and Modeling Complex Projects*, 1997, 17, pp. 21-43.
4. Ventcel E.S. "Theory of probabilities" ("Teoriya veroyatnostey"), Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 576 p.
5. Oleynikova S.A. "Computer experiment for the analysis of the distribution law of the random quantity that determines the duration of the project in problems of network planning and management", *Economics and Management of Control Systems (Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya)*, 2013, vol.9, no. 3, pp. 90-96.
6. Kobzar' A.I. "Applied mathematical statistics. For engineers and scientists" ("Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnyh rabotnikov"), Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p.

Submitted 15.04.2019; revised 31.05.2019

Information about the authors

Svetlana A. Oleynikova, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia) e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com

Konstantin E. Kiselev, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bedrrin11@gmail.com

Ivan A. Selishchev, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: selishcheviv@gmail.com

АНАЛИЗ ВЗАИМНОГО ТЕПЛООБМЕНА РЕБРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ

А.И. Борисова, В.Л. Бурковский, Ю.В. Писаревский, В.Б. Фурсов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается поверхность с ребрами прямоугольного профиля, которые воспринимают тепловой поток от некоторого источника теплоты и рассеивают его в окружающую среду за счет радиации. Для достижения стационарного температурного режима механотронной системы, имеющей систему источников теплоты, необходимо создать систему стоков теплоты, мощность которой равна суммарной мощности источников. Сток обеспечивается путём контакта границ тепловыделяющих элементов с другими конструктивными элементами или непосредственно с внешней средой. Условия теплообмена на поверхности могут меняться в зависимости от изменения внешних условий. Использование такого теплостока предопределяет наличие в тепловой системе трех видов теплообмена: теплопроводность или кондукция в твёрдых телах; конвекция и радиация на границе твердых тел с внешней средой, выполнение оценки каждого вида теплообмена для построения более рациональной системы охлаждения устройства. Актуальность исследований, характеризующая научно-техническую направленность, производственно-технологические аспекты создания такой аппаратуры нового поколения в факторах совместимости противоположностей «вакуум-ресурс-цифро-функция» при условиях переменных внешних и внутренних тепловых потоков, выделяет задачу теплообмена и защиты совмещенных интегрированных негерметизированных механотронных конструкций

Ключевые слова: ребра, механотронные системы, теплообмен, теплопроводность, тепловыделяющие элементы, стационарный режим

Введение

Основной принцип организации и размещения теплостоков, который должен учитываться при проектировании механотронных систем, сводится к следующим положениям [1, 2]:

1) теплосток должен быть разделён на несколько стоков в соответствии с числом источников тепла;

2) стоки следует размещать в непосредственной близости от источников тепла, избегая наличия между ними пассивных тел. При условии максимально развитой поверхности контакта.

В соответствии с положением 2, эффективность теплообмена оболочки механотронной системы во многом определяется наличием ребристых поверхностей. Ребра на поверхности оболочки позволяют значительно увеличить площадь охлаждения.

Переносу теплоты теплопроводностью отвечает закон Фурье [1]:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1)$$

связывающий плотность теплового потока q в направлении нормали n с градиентом темпера-

туры T (интенсивность теплопереноса характеризуется коэффициентом теплопроводности λ).

Конвективный перенос теплоты описывается законом Ньютона – Рихмана:

$$q_{zp} = \alpha \cdot F \cdot (T_{zp} - T_0), \quad (2)$$

устанавливающим связь плотности теплового потока на границе q_{zp} с разностью температур этой границы T_{zp} и окружающей среды T_0 при коэффициенте теплообмена или коэффициенте теплоотдачи α и поверхности F . Уравнения (1) и (2) показывают, что в случае теплопроводности или конвекции перенос энергии между частями тела зависит от разности температур этих частей в первой степени. В том случае, когда необходимо учитывать перенос тепловой энергии за счёт радиации или излучения, теплообмен зависит от разности абсолютных температур, где каждая составляющая в четвёртой степени в соответствии с законом Стефана – Больцмана:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/ (м²·К⁴)); ε – степень черноты излучающей поверхности (оболочки); F – площадь излучающей поверхности.

Методы исследование тепловых потоков

Уравнения (1), (2) и (3) показывают основное различие теплообмена в нормальных условиях на земле и в космосе, где отсутствует естественная конвекция. Кроме того, важной особенностью космического пространства является отсутствие среды. Тепловое излучение распространяется в вакууме. Поэтому отвод избыточного тепла в космическое пространство может быть осуществлён в виде излучения с поверхности механотронной системы [3]. Внутри негерметичных космических аппаратов осуществляется также два вида теплообмена, лучистый теплообмен и теплообмен теплопроводностью (кондукция). На практике, как правило, один из видов теплообмена является определяющим.

Из уравнения (2) следует, что разность температур между поверхностью и окружающей средой $\Delta\theta$ при постоянном значении отводимого теплового потока P равна:

$$\Delta\theta = \frac{P}{\alpha \cdot F} \quad (4)$$

Исследования влияния ребер охлаждения на температуру электротехнического объекта показывают [1, 2], что эффект от увеличения поверхности охлаждения объекта за счет ребер оказывается меньше ожидаемого. Это связано с тем, что коэффициент теплоотдачи α с единицы оребренной поверхности оказывается зависящим от густоты ребер. С увеличением густоты ребер коэффициент α заметно снижается. Кроме этого тепловой поток, отводимый с поверхности охлаждения ребра, преодолевает сопротивление самого ребра, которое зависит от коэффициента теплопроводности материала ребра. Очевидно, что в условиях космического пространства рассмотренные негативные факторы усиливаются, а процесс теплоотдачи ухудшается. Конвективный теплообмен исчезает, и определяющими становятся лучистый и кондуктивный теплообмен. Кондуктивный теплообмен осуществляется за счёт контакта механотронного устройства с конструктивными элементами космического аппарата. Такой тип теплообмена требует дополнительных исследований.

При этом материал оболочки механотронного модуля должен быть лёгким и прочным с достаточно высоким коэффициентом теплопроводности λ . Кроме этого, исследования, выполненные в нормальных условиях земли [1], показывают, что форма ребер также влияет на теп-

лообмен оребренной поверхности и окружающей среды.

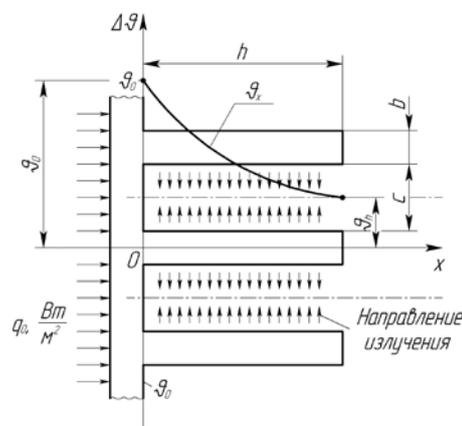


Рис. 1. Участок оребренной поверхности и предполагаемое распределение температуры в ребре

Коэффициент теплоотдачи излучением α вводится по аналогии с конвективной теплоотдачей и определяется в соответствии с законом Стефана – Больцмана. Как показано в [1], распределение температуры в ребре прямоугольного профиля (рис.1) можно получить аналитически в соответствии с законами (1) и (2) [4].

Распределение температуры вдоль оси ребра описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2\Theta}{dx^2} - \frac{2\alpha}{\lambda b} \cdot \Theta = 0, \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи охлаждаемой поверхности, Вт/(м²К); λ – коэффициент теплопроводности материала ребра, Вт/(м·К); Θ – превышение температуры ребра над температурой окружающей среды. Решение уравнения (5) имеет следующий вид:

$$\theta = \theta_0 \cdot (ch mx - th mh \cdot sh mx) \quad (6)$$

где θ_0 – температура в основании ребра ($x=0$), °К;

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda b}}, \quad (7)$$

где b – средняя ширина ребра, м.

Рассмотренная математическая модель не позволяет проанализировать всё многообразие возможных форм ребер, а также переоблучение поверхности ребер в условиях лучистого теплообмена при отсутствии конвекции. Однако возможность определения теплового потока P_0 через ребро позволяет воспользоваться понятием термического сопротивления ребра R_p :

$$R_p = \frac{\Theta}{P_0} = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\alpha \cdot \lambda b} \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda b}} \cdot h \right)}, \quad (8)$$

где L – аксиальная длина ребра, м; h – высота ребра, м. Кроме этого предлагается [1] оценивать форму ребра по коэффициенту эффективности $k_{эф}$:

$$k_{эф} = \frac{P_0}{P_m} = \frac{th \cdot mh}{mh}, \quad (9)$$

где P_0 – тепловой поток через ребро, Вт; P_m – максимальное значение теплового потока, Вт.

Максимальное значение теплового потока достигается в идеальных условиях при коэффициенте теплопроводности ребра равном бесконечности. Уравнения (6, 7, 8, 9) учитывают теплоотвод с боковых поверхностей ребра, причем теплоотводом с вершины ребра пренебрегается. В условиях космического пространства переизлучение между параллельно расположенными ребрами (рис. 1) приводит к тому, что тепловым потоком с боковых поверхностей ребра можно пренебречь и остаётся излучение только с вершины ребра. Очевидно, что ребра такой конструкции хорошо работают в условиях конвективного теплообмена и совершенно не эффективны при теплообмене за счет излучения. В соответствии с рассмотренной выше теорией гладкая поверхность имеет самый высокий коэффициент эффективности $k_{эф}=1$. Это очевидно из следующего уравнения:

$$k_{эф} = \frac{P_0}{P_m} = \frac{\frac{\Theta_0}{R_\alpha + R_\lambda}}{\frac{\Theta_0}{R_\alpha}} = \frac{R_\alpha}{R_\alpha + R_\lambda}, \quad (10)$$

где R_α – термическое сопротивление гладкой поверхности, К/Вт; R_λ – термическое сопротивление, определяемое коэффициентом теплопроводности ребра, К/Вт,

$$R_\lambda = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{h}{b \cdot L}, \quad (11)$$

где h – высота ребра; b – ширина ребра; L – длина ребра. Коэффициент эффективности стремится к единице при уменьшении высоты ребра h и стремлении R_λ к нулю. Существующая теория теплопередачи ребер прямоугольного сечения [1, 2] требует дополнительных исследований для устройств, работающих в условиях невесомости в негерметичных отсеках космических аппаратов.

Исследование возможных форм ребер

Существуют различные конфигурации ребер охлаждения, кроме прямоугольного могут быть профили треугольного, параболического, гиперболического, обратного параболического профилей, которые рассмотрены в специальной литературе [1, 2]. В любом случае целесообразно исследовать другие формы ребер охлаждения, которые не допускают переизлучения тепловой энергии между собой и могут располагаться как на плоской, так и искривлённой поверхностях, в частности, цилиндрической формы. Предлагаемые для исследования формы профилей ребер охлаждения представлены на рис. 2. При охлаждении объекта за счёт излучения тепловая энергия переносится в основном излучением с длинной волны 0,8...40 мкм, что соответствует инфракрасному диапазону. Электрическая машина является частью механотронной системы, ее допустимая рабочая температура определяется применяемым классом изоляции и свойствами постоянного магнита (если он используется в конструкции электрической машины).

Для оценки эффективности различных форм ребер путем численного моделирования процесса теплопередачи целесообразно задать тепловой поток, проходящим через основание ребра, и определить температуру соответствующих поверхностей.

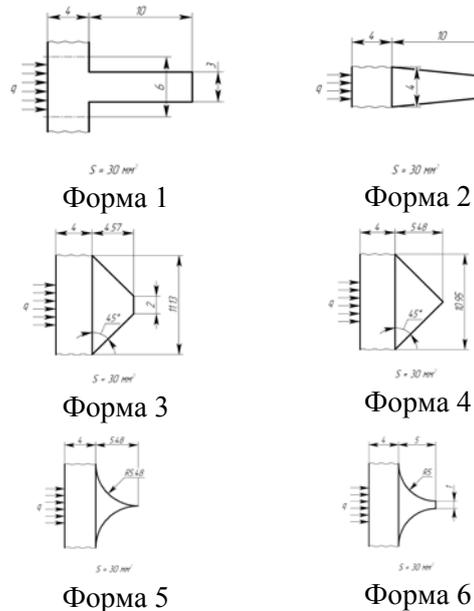


Рис. 2. Возможные формы ребер

В этом случае коэффициент эффективности может быть определен по соотношению термических проводимостей:

$$K_{эф} = \frac{\gamma_0}{\gamma_m}, \quad (12)$$

где γ_0 – термическая проводимость ребра с учетом его теплопроводности λ и теплоотдачи с поверхности ребра α

$$\gamma_0 = \frac{1}{R_\alpha + R_\lambda}, \quad (13)$$

γ_m – идеальная теплопроводность, при которой поверхность ребра имеет одинаковую температуру θ_0 при выполнении условия, λ равна бесконечности, сопротивление $R_\lambda = 0$

$$\gamma_m = \frac{1}{R_\alpha}. \quad (14)$$

Формы поперечного сечения ребер, представленные на рис. 2, могут иметь различные пространственные конфигурации. Прямые ребра, располагаемые на плоской или цилиндрической стенках, допускают двумерное решение задачи. В то же время все формы ребер (рис. 2) могут быть телами вращения. В этом случае решение задачи необходимо рассматривать в трехмерном пространстве как осесимметричное.

Моделирование температурного поля выполнялось при условии, что удельный тепловой поток в основании ребра остается без изменения и равен 1000 Вт/м^2 . Кроме этого, нормальные условия характеризуются наличием конвекции и радиации. Причем коэффициенты теплоотдачи соответствуют естественной конвекции $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ и для всех вариантов одинаковы [5].

Выводы

Формы ребер для моделирования подобраны таким образом, что площадь сечения формы сохраняется равной 30 мм^2 . Это позволяет сохранить массу ребер постоянной при сравнении ребер по коэффициенту эффективности. Логика построения эффективной системы охлаждения диктует следующую последовательность исследования: вначале определяется наиболее эффективная форма элемента поверхности; на следующем этапе из этих элементов строится поверхность охлаждения; поверхности позволяют сформировать оболочку механотронного модуля и выполнить исследование с учетом контакта оболочки с конструктивными элементами космического аппарата.

Литература

1. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах. В кн.: Учебник для вузов по специальности «Электромеханика», 1989. 239 с.
2. Борисенко А.И., Костиков О.Н., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. 276 с.
3. Борисова А.И. Теплоизоляционные режимы ЭМТД в негерметизированных комплексах КА // Мир Механотроники. 2016. №5. С. 90
4. Борисова А.И. Анализ тепловой характеристики электромеханотронных вакуумных исполнительных механизмов // Мир Механотроники. 2018. № 7. С. 68
5. Борисова А.И., Бурковский В.Л. Математическая модель процесса взаимного теплообмена в электромеханотронных механизмах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 87.

Поступила 25.04.2019; принята к публикации 31.05.2019

Информация об авторах

Борисова Алина Игоревна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: alinka_borisova93@mail.ru

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: bvl@vorstu.ru

Писаревский Юрий Валентинович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: 2732558@gmail.com

Фурсов Владимир Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: eayts@yandex.ru

ANALYSIS OF MUTUAL HEAT EXCHANGE OF A RIBBED SURFACE IN AN ELEKTROTECHNICAL COMPLEX

A.I. Borisova, V.L. Burkovskiy, Yu.V. Pisarevskiy, V.B. Fursov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a surface is considered with ribs of a rectangular profile that perceive the heat flow from a certain source of heat and dissipate it into the environment due to radiation. To achieve a stationary temperature regime of the mechatronic system having a system of heat sources, it is necessary to create a system of heat sinks whose power is equal to the total power of the sources. The sink is provided by contacting the boundaries of the fuel elements with other structural elements or directly with the external environment. Heat transfer conditions on the surface may vary depending on changes in external conditions. The use of such a heat sink determines the presence of three types of heat exchange in the heat system: thermal conductivity or conduction in solids; convection and radiation at the interface of solids with the external environment; evaluation of each type of heat exchange to build a more rational device cooling system. The relevance of research, characterizing the scientific and technical directivity, production and technological aspects of creating such equipment of the new generation, in the factors of compatibility of opposites “vacuum-resource-digital-function” under the conditions of variable external and internal heat fluxes, highlights the task of thermal rational exchange and protection of integrated non-sealed mechatronic designs

Key words: ribs, mechatronic systems, heat exchange, heat conductivity, fuel elements, stationary mode

References

1. Sipaylov G.A., Sannikov D.I., Zhadan V.A. “Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electrical machines” in the *Textbook for higher education institutions on specialty "Electromecanics" (Uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti «Elektromekhanika»)*, 1989, 239 p.
2. Borisenko A.I., Kostikov O.N., Yakovlev A.I. “Cooling of industrial electrical machines” (“Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin”), Moscow, Energoatomizdat, 1983, 276 p.
3. Borisova A.I. “The EMTD heatrational modes in the KA unpackaged complexes”, *World of Mechanotronics (Mir Mekhanotroniki)*, 2016, no. 5, p. 90
4. Borisova A.I. “Analysis of thermal characteristic of electromechanotronics vacuum executive mechanisms”, *World of Mechanotronics (Mir Mekhanotroniki)*, 2018, no. 7, p. 68
5. Borisova A.I., Burkovskiy V.L. “Mathematical model of process of mutual heat exchange in electro-mechatronic mechanisms”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, p. 87

Submitted 25.04.2019; revised 31.05.2019

Information about the authors

Alina I. Borisova, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: alinka_borisova93@mail.ru

Victor L. Burkovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: bvl@vorstu.ru

Yuriy V. Pisarevskiy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: 2732558@gmail.com

Vladimir B. Fursov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: eayts@yandex.ru

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОСТИ**О.Н. Чирков¹, М.А. Ромашенко¹, М.Ю. Чепелев²**¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются современные методы оценки канала мобильной радиосвязи в условиях многолучевого распространения сигналов, используемые в OFDM-системах, основанные на размещении пилотных (экспериментальных) данных. Для систем с ортогональным частотным мультиплексированием показаны основные виды позиционирования пилотных сигналов, отображены диаграммы размещения. Представлены ключевые разновидности интерполяции данных в OFDM: линейная, двоичная, по дискретному преобразованию Фурье DFT и интерполяция по методу минимальной среднеквадратичной ошибки MMSE. Приведена блок-схема и рассмотрен принцип работы DFT-интерполяции с использованием алгоритмов дискретного преобразования Фурье на N точек. Проведено моделирование приведенных методов оценки мобильного радиоканала связи в OFDM системе с $N_s = 64$ поднесущими, $N_p = 8$ пилотных символов, модуляция сигнала – QPSK. В качестве многолучевого канала радиосвязи использована модель Джейка с доплеровской частотой $f_d = 10^{-4}$ и числом лучей $L = 4$. Оценка эффективности рассмотренных методов осуществляется по зависимостям битовой и среднеквадратичной ошибок от отношения сигнал/шум. Представлены преимущества DFT - интерполяции над другими видами аппроксимаций. Результаты и выводы приведены в заключении статьи

Ключевые слова: оценка канала радиосвязи, пилотный сигнал, интерполяция

Введение

Сегодня системы цифровой мобильной радиосвязи развиваются стремительными темпами, благодаря постоянному усовершенствованию технологий передачи данных. Один за другим выходят новые стандарты, отличающиеся повышенной скоростью передачи данных, улучшенной помехоустойчивостью, мобильностью, габаритами приемника и передатчика. Однако даже в условиях тотального охвата базовыми станциями при передаче данных по цифровому мобильному каналу абонент получает сигнал в виде суммы прямых и отраженных лучей, вследствие многолучевого распространения сигнала.

Для борьбы с многолучевостью в условиях мобильной передачи информации необходимо постоянно отслеживать канал радиосвязи. Так для выявления помех, вносимых каналом связи, вместе с информационными символами передаются пилотные данные. Выделяют 3 основных вида позиционирования пилотов: блочный, комбинированный и решетчатый [1]. В

тракте приемника проводится оценка замираний, вносимых каналом радиосвязи по пилотным символам с известными амплитудо-фазовыми характеристиками. Далее осуществляется интерполяция данных пилота на искомые информационные символы для точного восстановления переданного сигнала.

В современных системах высокоскоростного беспроводного доступа 4G, LTE, LTE-A для борьбы с ошибками многолучевого распространения используют технологию ортогонального частотного мультиплексирования. OFDM-модуляция позволяет снизить ошибки приема сигнала за счет добавления циклического префикса – защитного интервала [2]. Оценка канала радиосвязи в таких системах осуществляется интерполяционными методами.

Виды пилотных сигналов в системах с OFDM

При блочном расположении пилотные символы периодически (t_p) вставляются во все поднесущие сигнала на частотной области [1] – рис. 1.

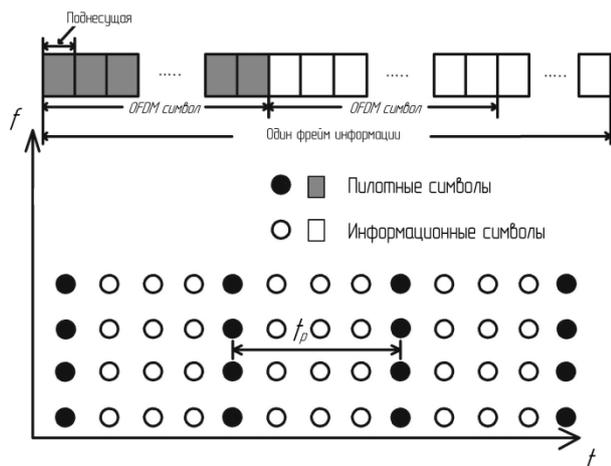


Рис. 1. Диаграмма блочного позиционирования пилотных данных

Период между пилотными (экспериментальными) символами $t_p \ll 1/f_d$.

При комбинированном позиционировании экспериментальных данных пилотные сигналы вставляются в каждый переданный символ на разные поднесущие с частотой (f_p) – рис. 2. Такой вид пилот-сигналов применяется для борьбы с временными задержками.

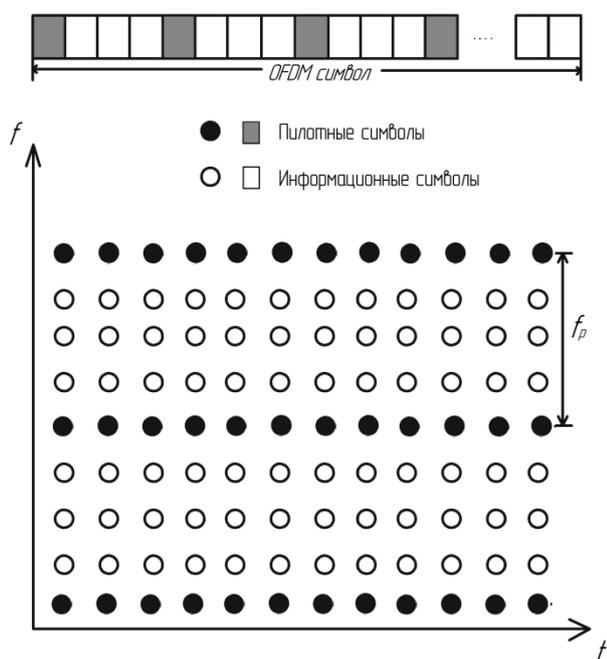


Рис. 2. Диаграмма комбинированного позиционирования пилотных данных

Частота f_p должна быть намного меньше пропускной способности [3] канала цифровой мобильной связи.

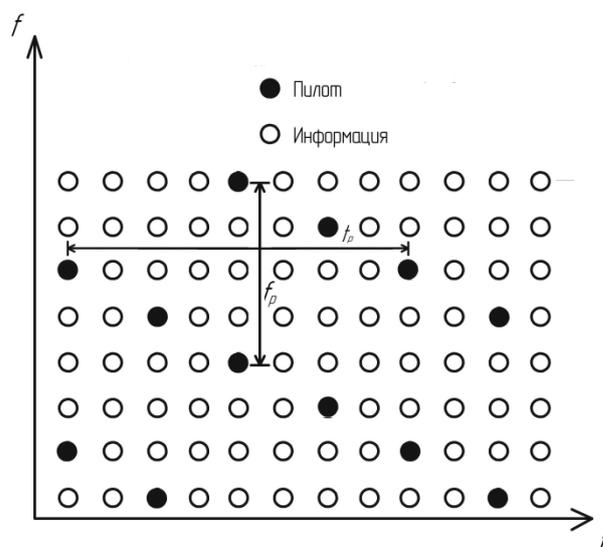


Рис. 3. Диаграмма решетчатого позиционирования пилотных данных

Для отслеживания частотно-селективных каналов радиосвязи, меняющихся еще и во времени, используют решетчатое позиционирование пилотных символов [1] – рис. 3.

Применения данного вида пилот-сигналов позволяет с минимальным количеством экспериментальных данных оценить потери сигнала во временном и частотном диапазонах при передаче по многолучевому каналу радиодоступа.

Линейная интерполяция

Оценка пилотных символов производится методом линейной аппроксимации. В зависимости от условий приема в системах связи с OFDM подбирается оптимальное число пилотных сигналов для восстановления сигнала с заданной битовой ошибкой BER. Оценка многолучевого канала радиосвязи по пилотам осуществляется согласно одному из основных методов: наименьших квадратов - LS, максимального правдоподобия – ML или минимальной среднеквадратичной ошибки MMSE [4, 1]. Оценку проводят как во временной, так и частотной областях, при этом методики подобны. Следовательно, в данной статье ограничимся рассмотрением одной области - частотной.

Тогда оценка канала на d -й поднесущей частоте, использующая линейную интерполяцию между p -й и $(p+1)$ пилотными поднесущими согласно [5], примет вид:

$$\hat{h}_f(d) = \hat{h}\left(p \frac{N_s}{N_p} + d\right) = \frac{(\hat{h}_f(p+1) - \hat{h}_f(p))d}{N_s/N_p} +$$

$$+\hat{h}_f(p) \quad (1)$$

$$0 \leq d < \frac{N_s}{N_p} - 1,$$

где $\hat{h}_f(p)$ обозначает канальную оценку пилота с индексом p в частотной области, полученную методом наименьших квадратов [2].

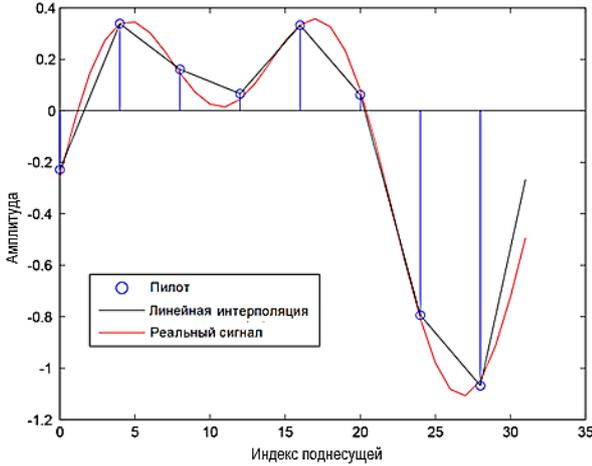


Рис. 4. Диаграмма линейной интерполяции

На рис. 4 отображена диаграмма линейной интерполяции при оценке радиоканала связи методом наименьших квадратов LS для сигнала с 8 пилотными поднесущими ($N_p = 8$), с числом принятых лучей ($L = 4$). Модель канала с рэлеевскими замираниями - ($N_s = 32, SNR = 30dB$).

Двоичная интерполяция

При вычислении интерполяции второго порядка используют оценку канала методом минимума среднеквадратичной ошибки. Отличие такой интерполяции от линейной в том, что используется аппроксимация 2-го порядка [6]:

$$\hat{h}_f(d) = \hat{h}_f\left(p \frac{N_s}{N_p} + d\right) = c_1 \hat{h}_f(p-1) + c_0 \hat{h}_f(p) + c_{-1} \hat{h}_f(p+1). \quad (2)$$

$$0 \leq d < \frac{N_s}{N_p} - 1,$$

$$c_1 = \frac{a(a-1)}{2},$$

$$c_0 = -(a-1)(a+1),$$

$$c_{-1} = \frac{a(a+1)}{2}, a = \frac{d}{N_s}.$$

Интерполяция по дискретному преобразованию Фурье

Если в тракте приемнике известна информация о длине многолучевого распространения сигнала в канале радиодоступа, то для получения импульсной характеристики радиоканала может быть использована интерполяция по выходным данным блока дискретного преобразования Фурье (рис. 5).

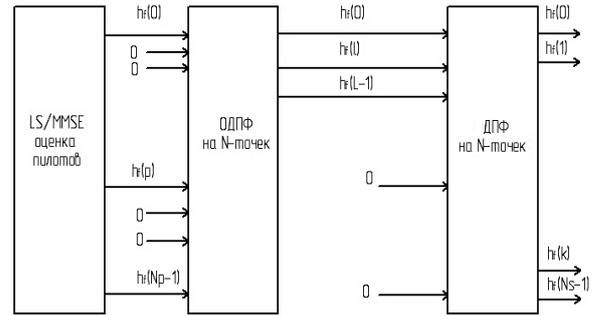


Рис. 5. Блок-схема интерполяции по дискретному преобразованию Фурье

Принятую пилотную поднесущую транслируемого сигнала можно выразить следующим образом [7]:

$$y_p = X \hat{h}_f + n, \quad (3)$$

где

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

X – матрица с пилотными данными. «1» обозначает экспериментальные символы, «0» – исковые информационные поднесущие.

Для восстановления импульсной характеристики канала радиосвязи по дискретному преобразованию Фурье можно использовать линейную интерполяцию. Тогда согласно оценке по методу наименьших квадратов в частотной области получим:

$$\hat{h}_p = X^{-1} y_p, \quad (5)$$

где

$$\hat{h}_p = [\hat{h}(0), 0, \dots, \hat{h}(N_p - 1)]^T.$$

Отсюда оценка импульсной характеристики канала по обратному быстрому преобразованию Фурье имеет вид:

$$\hat{h}_t = F^H \hat{h}_p . \quad (6)$$

Если известна длина многолучевого канала, то вектор \hat{h}_t может быть сокращен до

$$\hat{h}_t = [\hat{h}_t(0), \dots, \hat{h}_t(l), \dots, \hat{h}_t(L-1)]^T . \quad (7)$$

Отсюда запишем оценку канала после блока быстрого преобразования Фурье в частотной области:

$$\hat{h} = F \hat{h}_t . \quad (8)$$

Полученные выражения (6) и (8) для интерполяции дискретному преобразованию Фурье получили широкое распространение при оценке канала радиосвязи в системах OFDM, ведь для их нахождения достаточно расчета алгоритмов прямого и обратного быстрого преобразования Фурье [8], а также знать расстояние, которое прошел сигнал по многолучевому каналу удаленного доступа.

Интерполяция на основе минимальной среднеквадратичной ошибки

Для выделения импульсной характеристики канала радиосвязи методом минимальной среднеквадратичной ошибки (MMSE) необходимо знать значение корреляции канала R и отношение сигнал/шум σ_v^2/σ_s^2 . Дополнительная статистическая информация усложнит математический расчет. Несмотря на это, применение MMSE-интерполяции позволяет достичь значительного выигрыша помехоустойчивости при оценке многолучевого канала радиосвязи, по сравнению с рассмотренными методами линейной, двоичной и интерполяции по дискретному преобразованию Фурье (рис. 7).

Согласно [7] запишем выражение оценки пилотных символов по методу минимальной среднеквадратичной ошибки MMSE:

$$\hat{h}_t = R_{h_f \hat{h}_p} (R_{h_p h_p} + \frac{\sigma_v^2}{\sigma_s^2})^{-1} \hat{h}_p , \quad (9)$$

где

$$R_{h_f \hat{h}_p} = X R_{h_f h_f}$$

$$R_{h_p h_p} = X R_{h_f h_f} X^H .$$

Моделирование

Для сравнения характеристик,

приведенных методов интерполяционной оценки канала радиосвязи, проведем моделирование в пакете Matlab. В качестве многолучевого канала радиосвязи будем использовать модель Джейка с доплеровской частотой $f_d = 10^{-4}$, с числом лучей $L = 4$. Лучи имеют разную задержку и независимы друг от друга. OFDM система содержит 64 поднесущих $N_s = 64$ и восемь пилотных сигналов $N_p = 8$. Вид модуляции сигнала – QPSK. На рис. 6 и 7 приведены зависимости средней квадратичной ошибки MSE и битовой ошибки BER от отношения сигнал/шум (дБ) и соответственно.

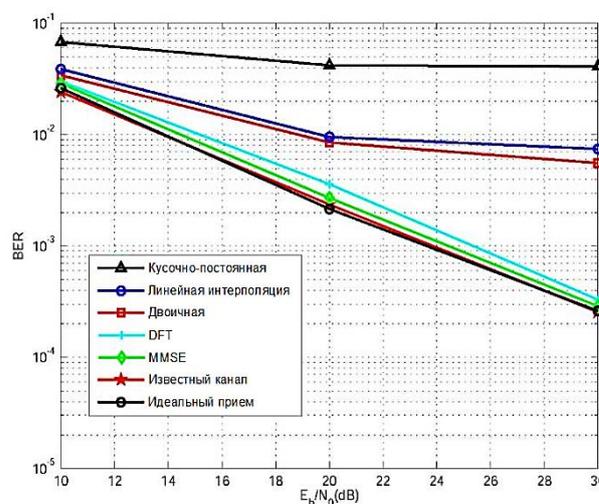


Рис. 6. Битовая ошибка при различных методах интерполяции для OFDM системы с QPSK модуляцией $N_s = 64, N_p = 8, L = 4$

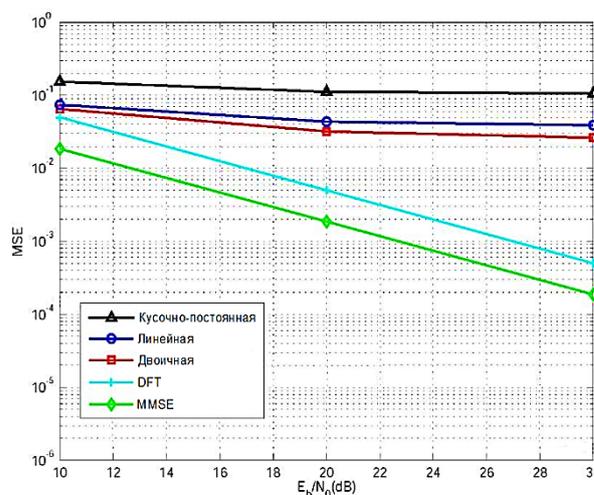


Рис. 7. Среднеквадратичная ошибка при различных методах интерполяции для OFDM системы с QPSK модуляцией $N_s = 64, N_p = 8, L = 4$

Моделирование включает линейную, двоичную интерполяцию, интерполяцию по дискретному преобразованию Фурье DFT и метод минимальной среднеквадратичной ошибки MMSE. При MMSE-интерполяции частотные характеристики канала связи для пилотных поднесущих оцениваются методом наименьших квадратов LS.

Заключение

Из графиков видно, что MMSE-интерполяция выигрывает в эффективности с точки зрения битовой и среднеквадратичной ошибок у других методов. Однако для его реализации требуется статистическая информация о канале радиосвязи – корреляция частоты канала R и отношение сигнал/шум SNR , откуда при расчете каждого OFDM-символа добавится инверсионная матрица R , что, несомненно, усложнит расчет. Также отметим, что DFT метод уступает 4 дБ MMSE-интерполяции в среднеквадратичной ошибке, но практически не уступает в битовой ошибке BER. При этом интерполяция по дискретному преобразованию Фурье в качестве дополнительной статистической информации использует лишь длину многолучевого канала, что дает преимущество в расчетах над MMSE-оценкой. Таким образом, с точки зрения простоты расчета и эффективности оценки

канала связи можно выделить DFT-интерполяцию.

Литература

1. Coleri S., Ergen M., and Puri A. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems // IEEE Trans. Broadcast. 2002. Vol. 48. No. 3. Pp. 223–229.
2. Чирков О.Н. Прямое формирование OFDM сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 54–56.
3. Чирков О.Н. Оценка пропускной способности высокоуровневых видов модуляции M-QAM // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 6. С. 12–13.
4. Чирков О.Н., Свиридова И.В., Бобылкин И.С. Оптимизация оценки многолучевого канала радиосвязи с OFDM // Труды международного симпозиума надежность и качество. Пенза: Пензенский государственный университет. 2018. Т. 2. С. 131–133.
5. Cimini L.J. Analysis of simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing // IEEE Trans. Commun. 2000. Vol. 30. Pp. 665–675.
6. Hsieh M. and Wei C. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels // IEEE Trans. Consum. Electron. 1998. Vol. 44. No. 1. Pp. 217–228.
7. Li Y., Cimini J. and Sollenberger N.R. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels // IEEE Trans. Commun. 1998. Vol. 46. No. 7. Pp. 902–915.
8. Чирков О.Н., Муратов А.В. Получение OFDM сигналов для высокоскоростных сетей WiMax // Труды международного симпозиума надежность и качество. Пенза: Пензенский государственный университет. 2012. Т. 1. С. 364.

Поступила 02.04.2019; принята к публикации 07.06.2019

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kopr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kopr@vorstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Чепелев Михаил Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский институт Федеральной службы исполнения наказаний (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская, д. 1-а), e-mail: mich72@mail.ru

MODERN METHODS OF RADIOCOMMUNICATION CHANNEL ESTIMATION IN CONDITIONS OF MULTIPATH

O.N. Chirkov¹, M.A. Romashchenko¹, M.Yu. Chepelev²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses modern methods for estimating a mobile radio channel under conditions of multipath propagation of signals used in OFDM systems, based on the placement of pilot (experimental) data. For systems with orthogonal frequency multiplexing, the main types of positioning of pilot signals are shown, and allocation diagrams are displayed. Key varieties of data interpolation in OFDM are presented: linear, binary, discrete Fourier transform DFT, and interpolation using the MMSE minimum mean square error method. A block diagram is given and the principle of operation of the DFT inter-

polation is considered using discrete Fourier transform algorithms for N points. Modeling the estimation methods of mobile radio communication channel in the OFDM system with $N_s = 64$ subcarriers, $N_p = 8$ pilot symbols, signal modulation - QPSK was carried out. The Jake model with the Doppler frequency $f_d = 10^{-4}$ and the number of beams $L = 4$ was used as a multipath radio channel. Evaluation of the effectiveness of the considered methods is carried out according to the dependences of bit and mean-square errors on the signal-to-noise ratio. The advantages of DFT interpolation over other types of approximations are presented. Results and conclusions are given in the conclusion of the article

Key words: radio channel estimation, pilot signal, interpolation

References

1. Coleri S., Ergen M., and Puri A. "Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems", *IEEE Trans. Broadcast*, 2002, vol. 48, no. 3, pp. 223–229.
2. Chirkov O.N. "Direct formation of OFDM signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5, pp. 54–56.
3. Chirkov O.N. "Bandwidth estimation of high-level types of modulation M-QAM", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 6, pp. 12–13.
4. Chirkov O.N., Sviridov I.V., Bobylkin I.S. "Optimization of the evaluation of a multipath radiocommunication channel with OFDM", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2018, vol. 2, pp. 131–133.
5. Cimini L.J. "Analysis of simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. Commun.*, 2000, vol. 30, pp. 665–675.
6. Hsieh M., Wei C. "Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels", *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 1998, vol. 44, no. 1, pp. 217–228.
7. Li Y., Cimini J., Sollenberger N.R. "Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels", *IEEE Trans. Commun.*, 1998, vol. 46, no. 7, pp. 902–915.
8. Chirkov O.N., Muratov A.V. "Obtaining OFDM signals for high-speed WiMax networks", *Proc. of the International Symposium: Reliability and Quality (Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma nadezhnost' i kachestvo)*, Penza State University, 2012, vol. 1, pp. 364.

Submitted 02.04.2019; revised 07.06.2019

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Mikhail Yu. Chepelev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (1-a Irkutskaya St., Voronezh 394072, Russia), e-mail: mich72@mail.ru

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ СПУТНИКОВОЙ РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**Н.Н. Долженков¹, Д.Г. Пантенков¹, А.Т. Егоров¹, А.А. Ломакин¹,
В.П. Литвиненко², В.И. Великоиваненко³, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю⁴**¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,
г. Королёв, Россия⁴ООО «СТЭК.КОМ», г. Москва, Россия

Аннотация: в настоящее время в РФ активно развивается беспилотная авиация в интересах различных заказчиков. При этом по состоянию на 2019 год отечественной промышленностью разработан типоряд комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБЛА) различного класса и целевого назначения – лёгкие («Типчак», «Zala 421-04M», «Элерон-3»), средние («Элерон-10», «Форпост», «Корсар»), тяжёлые («Орион»), сверхтяжёлые («Альтаир», «Охотник»), которые решают как задачи повышения обороноспособности и безопасности РФ, так и отвечают интересам гражданских потребителей. Одним из ключевых элементов КБЛА является радиолиния передачи целевой информации между БЛА и наземным пунктом управления (НПУ), причем информацию между БЛА и НПУ представляется возможным передавать как напрямую («точка-точка»), так и с использованием космических аппаратов (КА) на различных орбитах (загоризонтная радиосвязь). В качестве КА-ретрансляторов предлагается использовать отечественные орбитальные группировки на геостационарной орбите КА «Экспресс» и «Ямал», работающих в КУ-диапазоне частот и имеющих большую зону покрытия в Северном полушарии (за исключением приполярных областей). Это позволяет существенно повысить эффективность применения КБЛА при решении поставленных целевых задач за счет увеличения радиуса его действия. Данная статья посвящена рассмотрению технических характеристик экспериментального образца (ЭО) комплекса средств спутниковой радиосвязи (КССР) в интересах беспилотных летательных аппаратов большой продолжительности полета разработки группы компаний «Кронштадт», стендовым отрабаткам ЭО КССР в целях обеспечения готовности к проведению наземных комплексных испытаний

Ключевые слова: комплексы с беспилотными летательными аппаратами, космический аппарат, спутниковая радиосвязь, экспериментальный образец, комплекс средств спутниковой радиосвязи, бортовой спутниковый терминал, стендовые отработки, сигнально-кодовые конструкции, модуляция

Введение

В настоящее время в РФ и за ее пределами широкое применение во всех сферах жизни находят БЛА различного класса - легкие, средние, тяжелые. При этом применительно к тяжелым БЛА с большой продолжительностью полета предъявляется ряд повышенных требований, связанных с большой массой полезной нагрузки, радиусом применения, продолжительностью полета и т.д. На текущий момент все тяжелые БЛА в РФ функционируют в зоне прямой радиовидимости относительно НПУ либо по «полетному заданию» без возможности управления за пределами зоны радиовидимости НПУ. Группа компаний «Кронштадт» разработала и провела стендовую отработку экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи, основные технические

результаты представлены в данной статье.

Постановка задачи

В рамках выполнения научно-исследовательской работы (НИР) требовалось разработать комплекс средств спутниковой радиосвязи в интересах БЛА большой продолжительности полета, состоящего из бортовой и наземной частей и обеспечивающего передачу команд управления с НПУ на БЛА и телеметрии и целевой информации с БЛА на НПУ через один из отечественных космических аппаратов на высокой орбите [1-7].

Опыт ведущих мировых стран по применению КБЛА с использованием спутниковой радиолинии управления и передачи информации между БЛА и НПУ

Несмотря на тот факт, что применительно к функционированию отечественных БЛА задача передачи целевой и служебной

информации через КА на данный момент времени является относительно новой (отсутствуют опытные образцы бортовых терминалов), имеются зарубежные аналоги подобной аппаратуры, которые уже хорошо себя зарекомендовали и внедрены на все современные БЛА тяжелого и сверхтяжелого классов. Рассмотрим самые современные БЛА, имеющие в своем составе комплекс передачи данных через спутник, а также их основные технические характеристики [1-6].

RQ-4 (Global Hawk), США – стратегический разведывательный БЛА. Для выполнения поставленных задач RQ-4 оборудован радиолокатором с синтезированной апертурой, который работает сквозь облака и песчаные бури, а также электрооптической/инфракрасной системой формирования изображения.

Спектр возложенных задач включает в себя разведку для обеспечения войск информацией в мирное и военное время, повышает точность прицеливания высокоточного оружия, а также повышает защиту войск на передовой линии.

На рис. 1 представлен общий внешний вид и внешний вид в разрезе БЛА RQ-4 (Global Hawk).



Рис. 1. Общий внешний вид и внешний вид в разрезе БЛА RQ-4 (Global Hawk)

БЛА RQ-4 (Global Hawk) имеет длину 13,5 м, высоту 4,7 м, размах крыла примерно 35 м. Максимальная взлетная масса составляет около 15 тонн. При этом при скорости горизонтального полета от 600 до 800 км/ч дальность составляет 25000 км, что соответствует непрерывной продолжительности полета от 32 до 40 часов. На борту имеется спутниковый терминал с зеркальной антенной диаметром 1,22 м, что позволяет передавать информацию в реальном масштабе времени с информационной скоростью до 50 Мбит/с!

MQ-1 (Predator), США – многоцелевой беспилотный летательный аппарат, используется в разведывательных целях и применяется в боевых операциях. Комплекс Predator использует спутниковые радиопередачи для связи БЛА с наземной станцией управления и потребителями разведывательной информации, что позволяет получать информацию, не ограничиваясь зоной прямой радиовидимости.

На рис. 2 представлен внешний вид БЛА MQ-1 (Predator).



Рис. 2. Внешний вид БЛА MQ-1 (Predator)

БЛА MQ-1 (Predator) имеет длину 8,2 м, высоту 2,1 м, размах крыла примерно 15 м. Максимальная взлетная масса составляет не менее 1 тонны. При этом при скорости горизонтального полета от 110 до 130 км/ч дальность составляет 740 км, что соответствует непрерывной продолжительности полета от 20 до 40 часов. На борту имеется спутниковый терминал с зеркальной антенной диаметром 0,76 м, что позволяет передавать информацию в реальном масштабе времени с информационной скоростью до 2 Мбит/с.

Heron (Machatz), Израиль – разведывательный БЛА, предназначен для продолжительных полетов на средних и больших высотах. Данный БЛА имеет в своем составе цифровую систему управления, которая может передавать данные в обе стороны, способен одновременно отслеживать шесть целей, обозначая их для ракет, истребителей или вертолетов. Heron может быть укомплектован обширным набором полезной аппаратуры: оптико-электронные и ИК-системы, малогабаритные РЛС, станции радиотехнической разведки и т.д. (при этом модификация Heron под названием Eitan оснащается новейшими ударными комплексами и средствами управления огнем).

На рис. 3 представлен внешний вид БЛА Heron (Machatz).



Рис. 3. Внешний вид БЛА Heron (Machatz)

БЛА Heron (Machatz) имеет длину 8,5 м, высоту 2,3 м, размах крыла 16,6 м. Максимальная взлетная масса составляет 1130 кг. При этом при скорости горизонтального полета от 130 до 240 км/час дальность составляет 930 км, что соответствует непрерывной продолжительности полета от 30 до 36 часов. На борту имеется спутниковый терминал с зеркальной антенной диаметром 0,6 м, что позволяет передавать информацию в реальном масштабе времени с информационной скоростью до 5 Мбит/с.

Научно-технический задел и производственный задел Группы компаний «Кронштадт» (Московский филиал по беспилотному направлению) в части разработки экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи

Группа компаний «Кронштадт» (Московский филиал по беспилотному направлению) в рамках завершённой инициативной научно-

исследовательской работы (НИР) по созданию и испытаниям экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи разработала ЭО КССР, состоящий из бортового спутникового терминала (БСТ), смонтированного на технологической платформе (ТП) и представленного на рис. 4, и наземного спутникового терминала (НСТ), представленного на рис. 5.

Представленный на рис. 4 бортовой спутниковый терминал из состава ЭО КССР обеспечивает:

- передачу целевой и телеметрической информации от оборудования беспилотного летательного аппарата к НСТ через космический аппарат;
- прием командной информации от НСТ через КА и передача её оборудованию БЛА;
- автоматическое наведение антенной системы на КА и его автосопровождение.

В состав БСТ входят:

- антенная система (включает антенну на опорно-поворотном устройстве с облучателем и волноводными трактами, блок управления антенной на опорно-поворотном устройстве, усилитель мощности с преобразователем частоты «вверх», малошумящий усилитель мощности с преобразователем частоты «вниз», межблочные кабели);
- спутниковый радиомодем;
- блок подстройки по уровню принимаемого высокочастотного (ВЧ) сигнала.

Для обеспечения контроля и управления БСТ из состава ЭО КССР используется оборудование системы контроля и управления в составе:

- контроллер управления с установленным специальным программным обеспечением (СПО) для управления бортовым оборудованием БСТ и информационным сопряжением с наземным оборудованием системы контроля и управления НСТ;
- сетевой коммутатор.

В табл. 1 представлены основные технические характеристики БСТ из состава экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи, в табл. 2 - НСТ.

Представленный на рис. 5 наземный спутниковый терминал из состава ЭО КССР обеспечивает:

- прием целевой и телеметрической информации от бортового спутникового терминала;
- передачу командной информации к БСТ;
- автоматическое наведение антенной

системы на КА с подстройкой по уровню принимаемого сигнала;

- размещение наземного оборудования системы контроля и управления высокоскоростной радиолнией (ВРЛ).



Рис. 4. Внешний вид БСТ на технологической платформе



Рис. 5. Внешний вид НСТ в рабочем положении на прицепе

В состав НСТ входят:

- мобильная антенная система;
- контроллер управления антенны с

GPS/ГЛОНАСС приемником и модулем приемника маяка L-диапазона;

- усилитель мощности с преобразователем частоты вверх;

- малошумящий усилитель мощности с преобразователем частоты вниз;

- спутниковый модем;

- транспортная платформа на базе двусосного прицепа;

- кабельная сеть.

Для обеспечения контроля и управления НСТ из состава ЭО КССР используется оборудование системы контроля и управления ВРЛ в составе: АРМ системы контроля и управления ВРЛ (защищенный ноутбук), сервер с установленным преобразователем интерфейсов, контроллер управления с установленным специальным программным обеспечением для управления наземным оборудованием ВРЛ и информационным сопряжением с бортовым оборудованием системы контроля и управления ВРЛ, сетевой коммутатор, радиосервер точного времени.

Порядок и условия проведения стендовой отработки ЭО КССР на базе АО «РТИ» (г. Москва)

Стендовой отработке подвергался экспериментальный образец комплекса средств спутниковой радиолнии, состоящий из:

- БСТ, смонтированного на технологической платформе;

- бортового комплекта системы контроля и управления спутниковой радиолнии (БК СКУ СРЛ), с установленными специальными программными модулями (СПМ), БК СКУ СРЛ смонтирован на ТП;

- НСТ;

- возимого комплекта системы контроля и управления спутниковой радиолнии (БК СКУ СРЛ) с установленными СПМ. БК СКУ СРЛ смонтирован в аппаратном отсеке транспортной платформы НСТ.

Целью стендовых испытаний ЭО КССР является проверка работоспособности составных частей ЭО при их взаимодействии, отработка взаимодействия программного обеспечения системы контроля и управления спутниковой радиолнии (СКУ СРЛ) с оборудованием БСТ и НСТ [10-14].

В рамках подготовительных работ к стендовой отработке была разработана и изготовлена система подготовки и распределения электропитания (СПРЭ) для бортового оборудования

ЭО КССР. СПРЭ преобразует напряжение 220 В по переменному току от внешнего источника электропитания 28 В постоянного тока и распределяет его потребителям из состава бортового оборудования ЭО ВРЛ, также СПРЭ имеет в своем составе источник бесперебойного питания.

Для обеспечения электропитанием блока инерциальной навигационной системы (ИНС), привлекаемого для испытаний, в составе СПРЭ был использован дополнительный источник электропитания 24 В постоянного тока.

Блок ИНС, конвертор интерфейсов TCS-429E1 и две GPS-антенны были смонтированы на ТП, осуществлено подключение блока ИНС через конвертор интерфейсов к БСТ и подтверждено корректное информационно-логическое взаимодействие согласно руководству пользователя на ИНС и БСТ.

Внешний вид БСТ с установленной ИНС, смонтированного на ТП, представлен на рис. 6.

После проверки корректности информационного взаимодействия в антенной системе (АС) были внесены корректирующие сдвиги (офсеты) по углам крена, рысканья и тангажа, нивелирующие неточность взаимной установки блока ИНС и АС БСТ. Процедура внесения сдвигов осуществлена согласно руководству

пользователя на АС БСТ с наведением на заданном известном КА.

При проведении испытаний с ИНС и расположением GPS антенн на ТП обеспечивалась точность знания курса ИНС с погрешностью 0,5°.

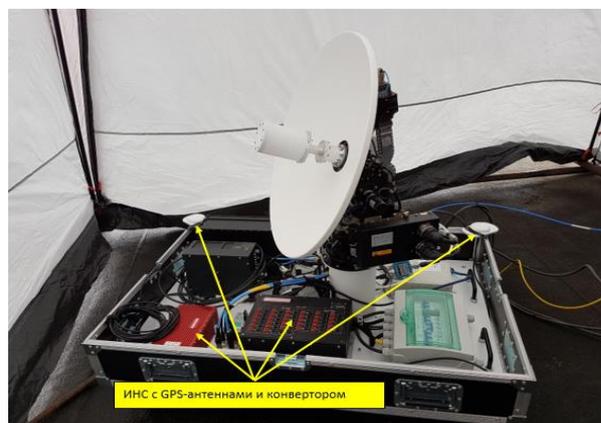


Рис. 6. Бортовое оборудование, смонтированное на технологической платформе

По завершению работ подтверждено корректное наведение АС БСТ на требуемый КА по вводимому значению долготы подспутниковой точки.

Таблица 1

Основные технические характеристики бортового спутникового терминала из состава экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи

№, п/п	Наименование характеристики	Значение характеристики
1	Максимальная масса, кг	50, не более
2	Максимальная мощность потребления, Вт	700, не более
3	Диаметр рефлектора антенны, мм	600, не более
4	Диапазон рабочих частот: - на прием, ГГц - на передачу, ГГц	от 10,95 до 12,75 от 13,75 до 14,50
5	Поляризация антенной системы: - прием - передача	линейная Вертикальная/горизонтальная Вертикальная/горизонтальная
6	Добротность антенной системы (G/T), дБ/К:	13,5, не менее
7	Диапазон углов поворота рефлектора антенной системы: - в азимутальной плоскости - в угломестной плоскости	360° от 0 до 90°
8	Максимальная скорость поворота рефлектора антенной системы, °/с - в азимутальной плоскости - в угломестной плоскости	40, не менее 40, не менее
9	Максимальное ускорение при повороте рефлектора бортовой антенной системы, °/с ² - в азимутальной плоскости - в угломестной плоскости	50, не менее 50, не менее

Продолжение табл. 1

10	Ослабление сигнала на прием и передачу, вызванное ошибкой наведения антенны в режиме слежения за КА	0,5 дБ, не более
11	ЭИИМ, дБВт	52
12	Поддерживаемая символьная скорость модема (SCPC), Мбод/с	от 0,3 до 10,0
13	Режим работы модема	SCPC, TDM/TDMA, TDM/TDMA Mesh, Hubless TDMA
14	Сигнально-кодовая структура	QPSK (поддержка FEC 1/3, 2/5, 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9), 8PSK (поддержка FEC 3/5, 2/3, 3/4, 5/6, 8/9), 16PSK (поддержка FEC 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, 8/9), помехоустойчивое кодирование LDPC+БЧХ
15	Система наведения антенной системы на КА	Автоматическая по сигналам от ИНС БЛА совместно с подстройкой по уровню принимаемого сигнала
16	Габариты антенной системы, ш/д/в, мм:	700/660/660 не более
17	Тип интерфейса для управления антенной системой	ARINC-429 и Ethernet 10BASE-T/100BASE-T(X)
18	Тип информационного интерфейса для приема и передачи информации от ЛА	Ethernet 10BASE-T/100BASE-T(X)
19	Тип разъемов бортового информационного интерфейса 10BASE-T/100BASE-T(X)	M12
20	Условия эксплуатации и окружающей среды	В соответствии с требованиями КТ-160

Таблица 2

Основные технические характеристики НСТ из состава экспериментального образца комплекса средств спутниковой радиосвязи

№, п/п	Параметр	Значение
1	Диаметр рефлектора антенной системы, м	2,4
2	Диапазон рабочих частот (Ки-диапазон): - на прием, ГГц - на передачу, ГГц	От 10,95 до 12,75 От 13,75 до 14,50
3	Поляризация антенной системы: - прием - передача	линейная вертикальная/горизонтальная вертикальная/горизонтальная
4	ЭИИМ, дБВт	63
5	Добротность G/T (при угле места 20 °)	25,9 дБ/К при T шума МШУ 70 °К
6	Диапазон углов поворота рефлектора антенной системы относительно посадочного места: - в азимутальной плоскости - в угломестной плоскости	± 200° от 0° до 90°
7	Система наведения антенны на КА	Автоматическая
8	Габариты в транспортном положении, ш/д/в, мм:	2050/4700/2100
9	Масса, кг	2000, не более
10	Тип электропитания	220 В, однофазное, переменное
11	Длина кабеля для подключения внешнего электропитания, м	50
12	Мощность энергопотребления, Вт	1700, не более
13	Мощность собственной ДГУ, кВт	5
14	Тип информационного интерфейса	Ethernet 10BASE-T/100BASE-T(X)
15	Тип разъема информационного интерфейса	RJ-45
16	Тип прицепа	Двухосный, рамный
17	Диапазон рабочих температур, С°	От минус 40 до плюс 50

На рис. 7 изображена схема взаимодействия оборудования ЭО КССР на момент проведения стендовой отработки. Информационно-логическое взаимодействие бортового и наземного оборудования осуществлено посредством Ethernet-кабеля и двух маршрутизаторов.

В ходе промежуточных работ отлажена СКУ СРЛ и информационно-логическое взаимодействие между бортовым и наземным оборудованием ЭО КССР.

Доработанная схема соединений (на время стендовых отработок) представлена на рис. 8.

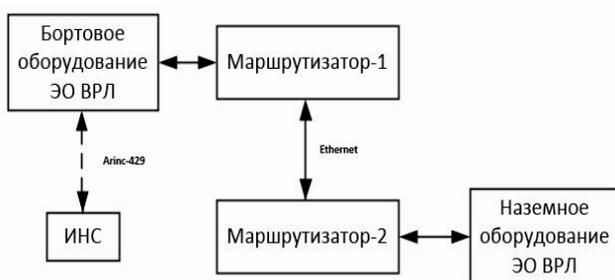


Рис. 7. Схема взаимодействия оборудования ЭО КССР на стендовой отработке

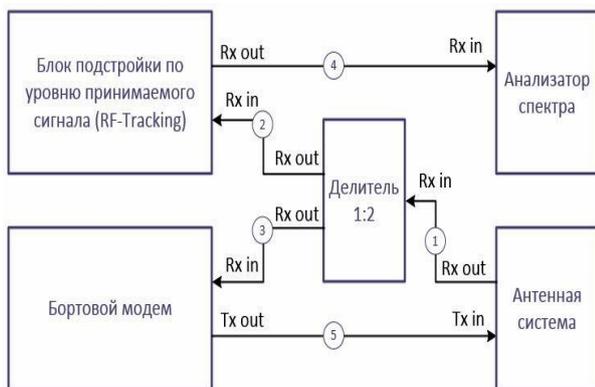


Рис. 8. Временная схема БСТ для проведения испытаний

После проведения стендовых отработок были выполнены дополнительные работы на территории АО «РТИ», в ходе которых были проведены предварительные проверки работоспособности ЭО КССР с привлечением частотного ресурса спутника-ретранслятора «Экспресс-АМ22». В рамках этих работ осуществлены: успешная организация канала связи через КА, выдача команд СКУ СРЛ на бортовое и наземное оборудование с контролем их исполнения, прием и обработка СКУ СРЛ телеметрии бортового и наземного оборудования, отработка в неполном объеме и

верификация программы и методики наземных комплексных испытаний ЭО КССР.

По результатам стендовых отработок ЭО КССР была подтверждена готовность оборудования ЭО КССР к проведению наземных комплексных испытаний в ЦКС «Дубна» - филиале ФГУП «Космическая связь» (г. Дубна).

Заключение

1. Разработан экспериментальный образец комплекса средств спутниковой радиосвязи, обладающий техническими характеристиками не хуже современных мировых аналогов.

2. Разработанный Группой компаний «Кронштадт» экспериментальный образец комплекса средств спутниковой радиосвязи является первым отечественным ЭО КССР в интересах комплексов с БЛА, который подтвердил свои заявленные характеристики в части передачи командно-телеметрической и целевой информации в реальных условиях.

3. Проведены стендовые отработки ЭО КССР, показавшие техническую работоспособность аппаратуры по основному целевому назначению и её готовность к дальнейшему продолжению работ в части наземных комплексных испытаний в Центре космических систем «Дубна» - филиале ФГУП «Космическая связь» (г. Дубна).

4. Дальнейшая доработка ЭО КССР до опытного образца с выпуском необходимого объема конструкторской, эксплуатационной и программной документации позволит его использовать в составе отечественных комплексов с БЛА тяжелого и сверхтяжелого классов в интересах решения разнородных целевых задач.

Литература

1. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Ларин В.К. Информационное обеспечение управления космическими аппаратами. Системный подход к решению задач. М.: Издательство «Радиотехника», 2019. 272 с.
2. Космические системы ретрансляции / Н.А. Тестоведов, В.Е. Косенко, Ю.Г. Выгонский, А.В. Кузовников, В.А. Мухин, В.Е. Чеботарев, В.Г. Сомов. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 448 с.
3. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов / под ред. А.Л. Бузова, С.А. Букашкина. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 448 с.
4. Современные технологии радиомониторинга в спутниковых системах связи и ретрансляции / под ред. А.В. Кузовникова. М.: Издательство «Радиотехника», 2015. 216 с.
5. Журавлев В.И., Руднев А.Н. Цифровая фазовая модуляция. М.: Издательство «Радиотехника», 2012. 208 с.
6. Немировский М.С., Локшин Б.А., Аронов Д.А. Основы построения систем спутниковой связи. М.: Издательство

«Горячая линия-Телеком», 2017. 432 с.

7. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусakov, П.В. Донченко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 2 (75). С. 48-56.

8. Пат. 0002556429 Российская Федерация, МПК Н 04 В 1/10 (2006.01). Некогерентный цифровой демодулятор «в целом» кодированных сигналов с фазовой манипуляцией / Литвиненко В.П., Глушков А.Н., Пантенков Д.Г.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический университет. 10.07.2015, Бюл. № 19. 7 с.

9. Методический подход оценки компенсации доплеровского смещения частоты в спутниковых линиях информационного обмена при эксплуатации космических систем связи / А.В. Вейко, В.И. Великоиваненко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.С. Константинов, Д.Д. Тюрина // Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудова-

ния и эксплуатации летательных аппаратов: сб. науч. тр. М.: Филиал ФГУП «ЦЭНКИ»-КБТХМ, 2018. Ч. 1. С. 289-297.

10. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов / под ред. А.Л. Бузова. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 448 с.

11. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / под ред. В.Н. Лепина. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 416 с.

12. Рудой В.М. Системы передачи информации. М.: Издательство «Радиотехника», 2007. 280.

13. Марковская теория оценивания в радиотехнике / под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Издательство «Радиотехника», 2004. 504 с.

14. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. М.: Издательство «Радиотехника», 2005. 368 с.

Поступила 29.04.2019; принята к публикации 05.06.2019

Информация об авторах

Долженков Николай Николаевич – д-р техн. наук, генеральный директор, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), тел. 8(495)230-00-36, e-mail: Nikolay.Dolzhenkov@kronshtadt.ru

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, начальник отделения радиосвязного оборудования, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Егоров Александр Тимофеевич – начальник отдела систем радиосвязи АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshtadt.ru

Ломакин Андрей Александрович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshtadt.ru

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, д. 14), e-mail: litvinvp@gmail.com

Великоиваненко Владимир Ильич – д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4), тел. 8(495) 513-45-66, e-mail: velikoivanenkovi@tsniimash.ru

Лю-Кэ-Сю Елена Юльевна – руководитель направления по работе с заказчиками на авиационном транспорте, ООО «СТЭК.КОМ» (123060, г. Москва, ул. Берзарина, д. 35, строение 1), тел. 8(495) 363-91-40, e-mail: elena.lukesu@stecom.ru

TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE MEANS FOR SATELLITE RADIOCOMMUNICATION WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

**N.N. Dolzhenkov¹, D.G. Pantenkov¹, A.T. Egorov¹, A.A. Lomakin¹,
V.P. Litvinenko², V.I. Velikoivanenko³, E.Yu. Lu-Ke-Syu⁴**

¹"Kronstadt", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Federal State Unitary Enterprise "Central Research Institute of Mechanical Engineering",
Moscow region, Korolyev, Russia

⁴Limited liability company "STEC.COM", Moscow, Russia

Abstract: at present, unmanned aircraft in the interests of various customers are actively developing in the Russian Federation. At the same time, as of 2019, the domestic industry has developed a type-series of complexes with unmanned aerial vehicles (CUAV) of various classes and purposes — light ("Tipchak", "Zala 421-04M", "Eleron-3"), medium ("Eleron-10", "Fortpost", "Korsar"), heavy ("Orion"), super-heavy ("Altair", "Okhotnik"), which solve both the tasks of increasing the defense capability and security of the Russian Federation, and meet the interests of civilian consumers. One of the key elements of the UAV is the radio link for transmitting the target information between the UAV and the ground control station (GCS), and it is possible to transmit information between the UAV and the GCS, either directly (point-to-point) or using spacecraft in different orbits (over the horizon radio). It is proposed to use domestic orbital constellations in the geostationary orbit of the "Express" and "Yamal" satellites as satellite repeaters working in KU-frequency range and having a large coverage area in the Northern Hemisphere (with the exception of the polar regions). This allows you to significantly improve the efficiency of the

use of CUAV in solving the set targets by increasing its radius of action. This article is devoted to the consideration of the technical characteristics of an experimental model (EM) of a satellite radio communications system (SRCS) in the interests of unmanned aircraft of a long duration developed by the group of companies Kronstadt, EM of the SRCS in order to ensure readiness for carrying out ground complex tests

Key words: complexes with unmanned aerial vehicles, radio line, spacecraft, satellite radiocommunication, experimental sample, satellite radiocommunication facilities, onboard satellite terminal, bench testing, signal-code design, modulation

References

1. Tyulin A.E., Betanov V.V., Larin V.K. "Information support of spacecraft control. System approach to problem solving" ("Informatsionnoe obespechenie upravleniya kosmicheskimi apparatami. Sistemnyy podkhod k resheniyu zadach"), Moscow, Radioelektronika, 2019, 272 p.
2. Testodov N.A., Kosenko V.E., Vygonkiy Yu.G., Kuzovnikov A.V., Mukhin V.A., Chebotarev V.E., Somov V.G., ed. A.V. Kuzovnikov "Space system relaying" ("Kosmicheskie sistemy retranslyatsii"), Moscow, Radioelektronika, 2017, 448 p.
3. Ed. Buzov A.L., Bukashkin S.A. "Special radiocommunication. Development and modernization of equipment and facilities" ("Spetsial'naya radiosvyaz'. Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob"ektov"), Moscow, Radioelektronika, 2017, 448 p.
4. Ed. Kuzovnikov A.V. "Modern technologies of radio monitoring in satellite communication and retransmission systems" ("Sovremennye tekhnologii radiomonitoringa v sputnikovykh sistemakh svyazi i retranslyatsii"), Moscow, Radioelektronika, 2015, 216 p.
5. Zhuravlev V.I., Rudnev A.N. "Digital phase modulation" ("Tsifrovaya fazovaya modulyatsiya"), Moscow, Radioelektronika, 2012, 208 p.
6. Nemirovskiy M.S., Lokshin B.A., Aronov D.A. "Fundamentals of building satellite communication systems" ("Osnovy postroyeniya sistem sputnikovoy svyazi"), Moscow, "Goryachaya liniya-Telekom", 2017, 432 p.
7. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Donchenko P.V., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Satellite communication system with consecutive zone service", *Astronautics and Rocket Production (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2014, no. 2 (75), pp. 48-56.
8. Litvinenko V.P., Glushkov A.N., Pantenkov D.G. "Non-coherent digital demodulator "in General," coded signals with phase manipulation" ("Nekogerentnyy tsifrovoy demodulyator «v tselom» kodirovannykh signalov s fazovoy manipulyatsiyey"), patent 0002556429, Russian Federation, IPC N 04 V 1/10 (2006.01), 2015, bull. 19, 7 p.
9. Veyko A.V., Velikoivanenko V.I., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Konstantinov V.S., Tyurina D.D. "Methodical approach of assessment of compensation of the Doppler shift of frequency in satellite links of information exchange at operation of space communication systems", *Coll. of Papers: Problematic Issues of Development of Land Complexes, the Starting Equipment and operation of Aircraft (Problemye voprosy razvitiya nazemnykh kompleksov, startovogo oborudovaniya i ekspluatatsii letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr.)*, Moscow, "TsENKI"-KBTHM, 2018, part 1, pp. 289-297.
10. Ed. Buzov A.L. "Special radio. Development and modernization of equipment and facilities" ("Spetsial'naya radiosvyaz'. Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob"ektov"), Moscow, Radioelektronika, 2017, 448 p.
11. Ed. Lepin V.N. "Interference protection of radio electronic control systems of aircraft and weapons" ("Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniya letatel'nymi apparatami i oruzhiem"), Moscow, Radioelektronika, 2017, 416 p.
12. Rudoy V.M. "Information transmission systems" ("Sistemy peredachi informatsii"), Moscow, Radioelektronika, 2007, 280.
13. Ed. Yarlykov M.S. "Markov Theory of evaluation in radio engineering" ("Markovskaya teoriya otsenivaniya v radio-tekhnikе"), Moscow, Radioelektronika, 2004, 504 p.
14. Shelukhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.V. "Modeling of information systems" ("Modelirovanie informatsionnykh sistem"), Moscow, Radioelektronika, 2005, 368 p.

Submitted 29.04.2019; revised 05.06.2019

Information about the authors

Nikolay N. Dolzhenkov, Dr. Sc. (Technical), General manager, JSC Kronstadt (18, Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), e-mail: Nikolay.Dolzhenkov@kronshtadt.ru

Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), Head of the Department of Radiocommunication Equipment, Kronstadt (18, Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), tel. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Aleksandr T. Egorov, Head of the Department of Radiocommunication Systems of JSC "Kronstadt" (18, Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshtadt.ru

Andrey A. Lomakin, Cand. Sc. (Technical), Leading Researcher, JSC Kronstadt (18, Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshtadt.ru

Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

Vladimir I. Velikoivanenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Federal State Unitary Enterprise "Central Research Institute of Mechanical Engineering" (4, Pionerskaya str., Moscow region, Korolyev 141070, Russia), tel. 8(495)513-45-66, e-mail: velikoivanenkovi@tsniimash.ru

Elena Yu. Lu-Ke-Syu, Head of work with clients on air transport, Limited Liability Company "STEC.COM" (36/1, Berzarina str., Moscow 123060, Russia), tel. 8(495) 363-91-40, e-mail: elena.lukesu@steccom.ru

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ LDPC-ДЕКОДЕР, РАБОТАЮЩИЙ ПО АЛГОРИТМУ MIN-SUM, И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ПЛИС**А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассматривается схема последовательного LDPC-декодера для уменьшения сложности межсоединений в полностью параллельных кодах с малой плотностью проверок на чётность. Бит-последовательное декодирование также облегчает эффективную реализацию пространственно-программируемого декодирования LDPC. Чтобы упростить реализацию декодирования с битовой последовательностью, предложено новое приближение к функции обновления проверки в min-sum алгоритме декодирования. Предлагаемое правило обновления проверки вычисляет только абсолютный минимум и при необходимости корректирует исходящие сообщения. Также представлен 650 Мбит/с бит-последовательный (480, 355) LDPC-декодер на основе кода Рида-Соломона (RS), реализованный на ПЛИС Altera Stratix EP1S80. Это самый быстрый декодер LDPC на основе ПЛИС, о котором сообщалось в литературе. Описывается внутренняя архитектура для аппаратно-последовательной реализации битовых переменных и проверочных узлов. Также обсуждается, что в модифицированном алгоритме min-sum (MS) должна быть найдена только наименьшая величина среди всех проверочных входов. Кроме того, предложен алгоритм декодирования, который использует линейную аппроксимацию вместо одной нормализации или смещения для модифицированного обновления проверочного узла. Min-sum алгоритмы широко используются в практических приложениях благодаря их легкой аппаратной реализации

Ключевые слова: min-sum декодирование, LDPC-декодер, последовательное декодирование

Введение

Коды с малой плотностью проверок на четность (LDPC) [1] получили широкое распространение в системах передачи данных из-за их высокой производительности и возможности реализации параллельной архитектуры декодера. Коды LDPC допускают параллельное декодирование при передаче сообщений высокого уровня, в котором все проверочные и переменные узлы обновляются одновременно. Этот параллелизм потенциально может быть использован для построения декодера с пропускной способностью в несколько Гбит/с. Основным препятствием для эффективной реализации полностью параллельных LDPC-декодеров является сложность межсоединения, которая становится результатом случайного расположения единиц в матрице проверки четности кода.

В этой статье предложена бит-последовательная схема для полностью параллельных LDPC-декодеров. Бит-последовательное вычисление позволяет переменным и проверочным узлам передавать многобитовые сообщения по одному проводу, что снижает сложность межсоединений. Кроме то-

го, в статье предлагается новое приближенное значение для функции проверки обновлений при декодировании с минимальной суммой. В этом приближенном значении в каждом проверочном узле для всех входов проверочного узла вычисляется только одна минимальная величина. В зависимости от количества входов, которые имеют одинаковую минимальную величину, корректирующая константа затем добавляется для генерации правильных проверочных выходов. Показано, что при 4-битном квантовании это приближение уменьшает площадь проверочного узла на 48%, в то же время внося потери в производительность BER менее 0,1 дБ [1].

В статье показана возможность построения бит-последовательного LDPC-декодирования путем реализации (480, 355) кода Рида-Соломона LDPC-декодера на ПЛИС Altera Stratix EP1S80 на основе новой предложенной архитектуры проверочных узлов. Декодер работает с максимальной тактовой частотой 61 МГц, выполняет 15 итераций декодирования на кадр и обеспечивает пропускную способность 650 Мбит/с.

LDPC - код и min-sum декодирование

Двоичный $(N, N-M)$ LDPC-код, C , является

пустым пространством разреженной матрицы проверки четности $M \times N$, H . Он также может быть описан двудольным графом или графом Таннера. Граф Таннера LDPC-кода состоит из двух наборов узлов. Проверочные узлы $\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ представляют строки H и переменные узлы $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ представляют столбцы. Ребро соединяет проверочный узел c_m с переменным узлом v_n тогда и только тогда, когда H_{mn} не равен нулю. Для кода с полноразмерной матрицей проверки четности $M \times N$, H , скорость кода составляет $R = 1 - M/N$. Множество переменных, участвующих в проверке c_m , обозначим как $N(m) = \{n: H_{mn} = 1\}$, а множество проверочных, в которых участвует переменная v_n , через $M(n) = \{m: H_{mn} = 1\}$.

Min-sum (MS) декодирование можно рассматривать как приближенное значение к широко используемому итеративному алгоритму распространения доверия (SP). Хотя производительность MS, как правило, на несколько десятых дБ ниже, чем у декодирования SP, она более устойчива к ошибкам квантования при реализации с операциями с фиксированной запятой. Более того, для проверки функций узла требуется гораздо более простое аппаратное обеспечение по сравнению с декодированием SP. При декодировании MS, аналогично алгоритму SP, внешние сообщения передаются между проверочным и переменным узлами в форме логарифмического коэффициента правдоподобия (LLR). Пусть $z_{mn}^{(i)}$ представляет значение LLR для бита n , отправляемое из переменного узла v_n для проверки узла c_m в i -й итерации, и аналогичным образом $\epsilon_{mn}^{(i)}$ представляет значение LLR для бита n , отправляемое из проверочного узла c_m в переменный узел v_n в i -ю итерацию. Предположим, что $W = (w_1, w_2, \dots, w_N) \in \mathbb{C}$ и $Y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ - переданное кодовое слово и принятая последовательность соответственно. Алгоритм декодирования MS состоит из следующих этапов:

1. Инициализировать счетчик итераций, i , равным 1, и пусть I_M будет максимально допустимым числом итераций.

2. Инициализировать $z_{mn}^{(0)}$ для апостериорной LLR, $\lambda_n = \log(P(v_n = 0|y_n)/P(v_n = 1|y_n))$ для $1 \leq n \leq N, m \in M(n)$.

3. Обновить проверочные узлы, то есть для $1 \leq m \leq M, n \in N(m)$, рассчитайте

$$\epsilon_{mn}^{(i)} = \min_{n' \in N(m) \setminus n} |z_{mn'}^{(i)}| \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(z_{mn'}^{(i)}) \quad (1)$$

4. Обновите переменные узлы, то есть для $1 \leq n \leq N, m \in M(n)$, рассчитайте:

$$z_{mn}^{(i)} = \sum_{m' \in M(n) \setminus m} \epsilon_{m'n}^{(i)} \quad (2)$$

5. Применить сложное решение, то есть вычислить $\hat{W} = (\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_N)$, где элемент \hat{w}_n вычисляется как

$$\hat{w}_n = \begin{cases} 0 & \text{если } \lambda_n + \sum_{m \in M(n)} \epsilon_{mn}^{(i)} \geq 0, \\ 1 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Если $\hat{W}H^T = 0$ или $i \geq I_M$, прекратите декодирование и перейдите к шагу 6. В противном случае установите $i = i + 1$ и перейдите к шагу 3.

6. Вывести $\hat{W}^{(i)}$ в качестве выхода декодера.

Реализация декодера

При декодировании LDPC с передачей сообщений большое количество сообщений необходимо обновлять и передавать между проверочными и переменными узлами в каждой итерации. В аналоговых декодерах экспоненциальная зависимость напряжения от тока транзистора используется для реализации функций обновления передачи сообщений. Хотя аналоговые декодеры имеют преимущество низкого энергопотребления, они становятся непрактичными для декодирования длинных кодов LDPC из-за шума и несоответствия процесса [2].

Более традиционные LDPC-декодеры часто используют многобитовые цифровые сигналы для представления сообщений. В частично-параллельных декодерах сообщения передаются между узлами через память.

Эта архитектура уменьшает область декодера за счет совместного использования блоков обработки, но это происходит за счет снижения пропускной способности. Чтобы достичь более высокой пропускной способности, в полностью параллельном декодере, все проверочные и переменные узлы непосредственно создаются в аппаратном обеспечении. При помощи этой архитектуры сообщается о пропускной способности 1 Гбит/с с 64 итерациями на кадр. Основной проблемой при реализации полностью параллельных LDPC-декодеров является сложное и случайное соединение между переменным и проверочными узлами. Эта проблема усугубляется, когда для реализации ребер в графе кода Таннера используются многобитовые шины.

Бит-последовательное вычисление

Чтобы уменьшить сложность межсоединения в полностью параллельных LDPC-декодерах, в этой статье мы исследуем последовательный битовый подход как для связи, так и для вычисления внешних сообщений. На рис. 1 показана разница между обычной параллельной битовой схемой и последовательной битовой схемой для простого случая передачи n -битного числа, $b_n \dots b_2 b_1$. На рис. 1 (а) все n битов отправляются по n параллельным линиям за один такт. Напротив, в последовательной битовой схеме, как на рис. 1 (б), сообщение отправляется по одной строке за n тактов.

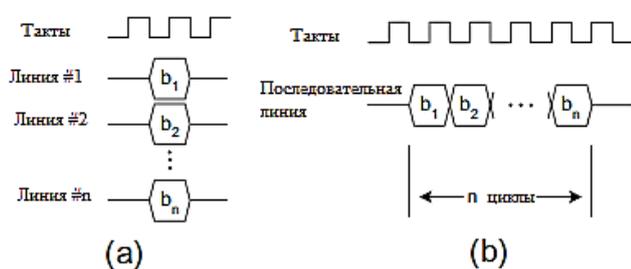


Рис. 1. Два варианта синхронной передачи n -битного числа: а - параллельного по битам: n битов, отправленных за один такт по n проводам; б - последовательный бит: n битов, отправленных за n тактов по одному проводу

Стохастические вычисления аналогичны бит-последовательным вычислениям в том, что они передают внешние сообщения по одному проводу. Кроме того, стохастическое вычисление использует избыточное представление чисел, которое ограничивает пропускную способность декодера [3].

В дополнение к упрощению межузловое соединения бит-последовательный подход имеет ряд других преимуществ для полностью параллельных LDPC-декодеров. В последовательной битовой схеме длина слова вычислений может быть увеличена просто путем увеличения количества тактовых циклов, выделенных для передачи сообщений. Используя это свойство, точность декодера можно сделать программируемой, просто переназначая передачу сообщений между узлами без необходимости в дополнительных каналах маршрутизации. Программируемость длины слова декодера позволяет эффективно компенсировать сложность для эффективности исправления ошибок.

Это, в свою очередь, позволяет эффективно реализовать декодирование с переключением передач. Декодирование с переключением передач основано на идее изменения правила

обновления декодирования, используемого на разных итерациях, чтобы одновременно оптимизировать аппаратную сложность и производительность по исправлению ошибок. Например, декодирование с переключением передач часто предлагает применять сложное мощное правило обновления в первые несколько итераций, за которым следуют более простые функции обновления в последующих итерациях. Последовательное вычисление битов позволяет эффективно переключаться между правилами обновления, изменяя длину слова вычислений.

Последовательное битовое декодирование, однако, создает некоторые проблемы. Непосредственный эффект заключается в том, что он уменьшает пропускную способность декодера по сравнению с полностью параллельными реализациями, поскольку для передачи одного сообщения требуется несколько тактов. Хотя последовательные битовые полностью параллельные LDPC-декодеры имеют более низкую пропускную способность по сравнению с параллельными битовыми полностью параллельными LDPC-декодерами, в этой статье показано, что их пропускная способность все еще может быть выше, чем у схем аппаратного декодирования с совместным использованием.

Алгоритм декодирования MS, как описано выше, является громоздким, если реализован в последовательном аппаратном декодере битов. В этом разделе мы вводим приближенное значение к алгоритму MS, которое уменьшает аппаратную сложность проверочных узлов при минимальном ухудшении производительности кода. Фактически, это приближенное значение также применимо к бит-параллельным аппаратным декодерам.

Первый шаг - заменить проверочное правило обновления (1) на

$$\epsilon_{mn}^{(i)} = \min_{n' \in N(m)} |z_{mn'}^{(i)}| \prod_{n' \in N(m) \setminus n} \text{sgn}(z_{mn'}^{(i)}). \quad (3)$$

Другими словами, знак выходных данных проверочного узла вычисляется точно так же, как и раньше, но теперь выходная величина является минимумом величин всех входных сообщений. На рис. 2 сравнивается производительность BER исходного алгоритма декодирования MS с модифицированным MS на основе (3) для двух кодов LDPC на основе RS с использованием вычислений с полной точностью. Этот график показывает, что при вычислениях с полной точностью оба алгоритма работают по-

что одинаково. Понятно, что проверочное правило обновления, как в (3), значительно уменьшает сложность оборудования. Причина в том, что как только найден минимум среди всех входных величин, он отправляется как величина всех исходящих сообщений, $\epsilon_{mn}^{(i)}$ для всех $n \in N(m)$.

Вышеуказанная модификация MS почти не приводит к потере производительности при операциях с полной точностью, она вносит значительные потери при выполнении с конечной точностью. На рис. 3 показан эффект приближения MS применительно к квантованным сообщениям. Знак выходных сообщений в новом правиле проверки обновлений такой же, как в (3). Величина выходного сообщения рассчитывается следующим образом. Во-первых, для проверки узла c_m в i -й итерации мы определяем

$$M_m^{(i)} = \min_{n' \in N(m)} |z_{mn'}^{(i)}|.$$

Мы также определяем $1 \leq T_m^{(i)} \leq d_c$ как число входов $z_{mj}^{(i)}$, чтобы проверить узел c_m , который удовлетворяет $|z_{mj}^{(i)}| = M_m^{(i)}$.

Величина выходных данных проверочного узла рассчитывается как

$$|\epsilon_{mn}^{(i)}| = \begin{cases} M_m^{(i)} + 1 & \text{если } T_m^{(i)} = 1 \text{ и } z_{mn} = M_m^{(i)} \\ M_m^{(i)} & \text{иначе} \end{cases}. \quad (4)$$

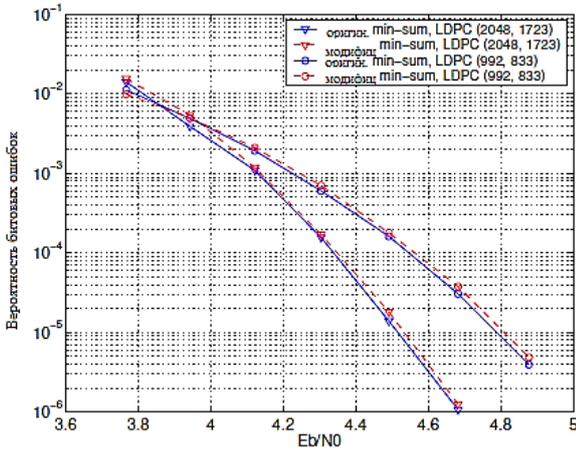


Рис. 2. Сравнение между оригинальным min-sum и модифицированным min-sum при операциях с полной точностью для кодов (2048, 1723) и (992, 833) LDPC

Результаты моделирования, представленные на рис. 3, показывают, что с новым правилом проверки обновлений с использованием 4-разрядного квантования разрыв производительности BER по сравнению с исходным 4-разрядным алгоритмом MS уменьшен с 0,7 дБ

до менее 0,1 дБ при BER 10^{-6} . Что еще более важно, эффект минимального уровня ошибки также избегается. Несмотря на дополнительное оборудование реализация VLSI контрольного узла степени 15 с использованием библиотеки ячеек CMOS - 90nm показывает, что проверочный узел на основе (4) на 48% меньше проверочного узла на основе (1). Это связано с тем, что нет необходимости вычислять второй минимум среди входных данных проверочного узла.

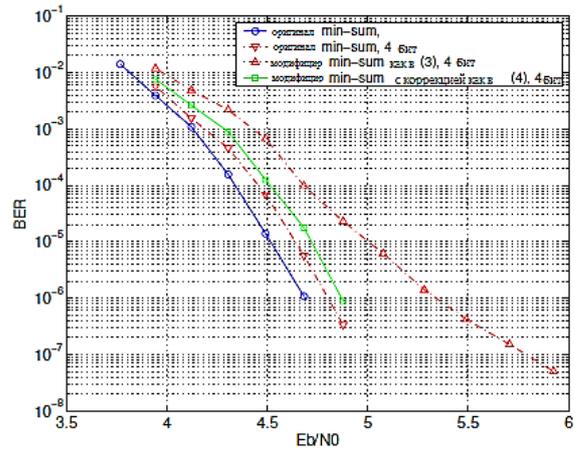


Рис. 3. Сравнение между оригинальным min-sum и модифицированным min-sum, как в (3) и (4) при операциях с фиксированной запятой для (2048, 1723) кода LDPC

На рис. 4 показан конвейерный битовый последовательный модуль, который находит минимум проверочных входов. Этот модуль получает d_c входы постоянного тока. Каждый вход представляет собой двоичное число n -битной величины знака, которое принимается последовательно (сначала MSB-бит). Выход представляет собой последовательный битовый n -битный номер, который соответствует наименьшей величине на входах. С каждым входом связан триггер, действующий как флаг состояния, который указывает, является ли этот вход кандидатом на то, чтобы быть минимальным. Вначале все флаги состояния сбрасываются на ноль. Когда принимаются биты MSB, некоторые флаги становятся «1», указывая на то, что соответствующий вход вне конкуренции. Схема на рис. 4 обрабатывает только величину входов проверочного узла, тогда как знаковый бит генерируется отдельно с использованием дерева XOR [4].

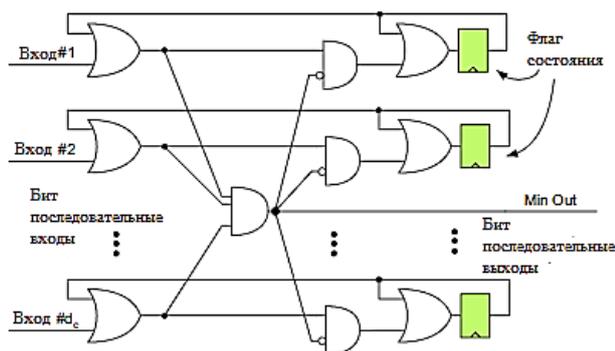


Рис. 4. Последовательный битовый модуль для определения минимальной величины входов проверочного узла

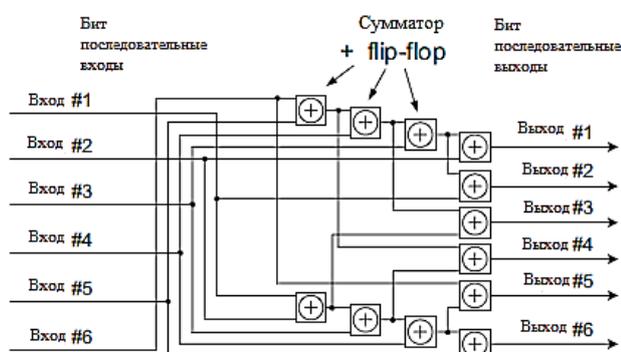


Рис. 5. Архитектура переменного узла степени 6 для вычислений (2). Каждый ящик сумматора состоит из полного сумматора и триггера для хранения переноса из предыдущего цикла

Чтобы найти эффективную бит-последовательную архитектуру переменного узла, мы исследовали две альтернативы. Первая архитектура, показанная на рис. 5, основана на вычислениях вперед-назад. Основное отличие состоит в том, что здесь все входы и выходы являются последовательными. Основная проблема с прямой и обратной архитектурой на рис. 5 состоит в том, что для переменного узла степени d_v критический путь состоит из цепочки $(d_v - 2)$ сумматоров с двумя входами. Для кодов LDPC с относительно высоким значением d_v это может ограничивать временные характеристики декодера. Вторая архитектура переменных узлов, исследованная в этой статье, показана на рис. 6. В этой архитектуре битовые последовательные входы сначала преобразуются в параллельные входы, а затем дополнения выполняются за один цикл с использованием параллельных сумматоров. Параллельные выходы, наконец, преобразуются обратно в бит-последовательный формат перед отправкой на проверку узлов. Табл. 1 суммирует стоимость

оборудования VLSI и производительность синхронизации двух переменных узлов степени 6, соответствующих двум вышеупомянутым альтернативам. Параметры в этой таблице основаны на результатах синтеза с использованием библиотеки ячеек CMOS 90nm и с 3-битным квантованием. Основываясь на табл. 1, мы использовали архитектуру переменного узла, показанную на рис. 6, поскольку она превосходит как по срокам, так и по площади. Как проверочные, так и переменные узлы в этом проекте являются конвейерными. Для n -битных квантованных входных сообщений они генерируют n -битные выходные сообщения в n тактовых циклах. Каждая итерация декодирования передачи сообщений LDPC состоит из одной проверки и одного обновления узла переменной. В результате, используя обычную схему, необходимо $2n$ тактов для завершения одной итерации. В то время как проверочные узлы обрабатывают один кадр, переменные узлы обрабатывают соседний кадр. Таким образом, для выполнения одной итерации требуется всего n циклов, что удваивает пропускную способность.

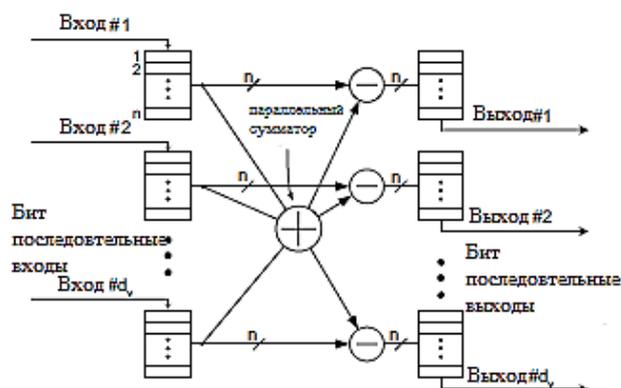


Рис. 6. Архитектура переменного узла для вычислений (2) с параллельными сумматорами и параллельно-последовательными преобразователями на входах и выходах

Таблица 1
Сравнение архитектур с переменным узлом на рис. 5 и на рис. 6 с $d_v = 6$

Архитектура	Скорость записи-чтения	Параллельный сумматор
Комбинационная зона (μm^2)	2484	2099
Некомбинационная площадь (μm^2)	623	405
Общая площадь (μm^2)	3107	2504
Минимальный период времени (нсек)	3	2,2

Чтобы продемонстрировать возможность бит-последовательного декодирования передачи сообщений, был разработан полностью параллельный (480, 355) декодер LDPC на основе кода Рида-Соломона на ПЛИС Altera Stratix EP1S80, используя настраиваемую макетную плату под названием Transmogrifiger-4. Этот декодер обновляет внешние сообщения, используя архитектуру узлов, показанную на рис. 4 и рис. 6. Поскольку обновленные сообщения передаются последовательно по одному проводу, сложность соединений между узлами меньше, чем у традиционных параллельных битовых полностью параллельных декодеров. На рис. 7 показана измеренная производительность BER от аппаратного обеспечения декодера, а также симуляция истинного бита. В табл. 2 приведены результаты реализации на ПЛИС. Декодер работает на тактовой частоте 61 МГц и выполняет 15 итераций на кадр. Используя метод чередования блоков и длину слова в 3 бита, для каждой итерации требуется 3 такта, что приводит к общей пропускной способности 650 Мбит/с.

Таблица 2

(480,355) LDPC-декодер на основе кода Рида-Соломона, реализованный на Altera Stratix EP1S80

Логические элементы	66,588 (84%)
Максимальная тактовая частота (МГц)	61
Длина кода	480
Итераций на кадр	15
Длина слова	3
Пропускная способность декодера (Мбит/с)	650

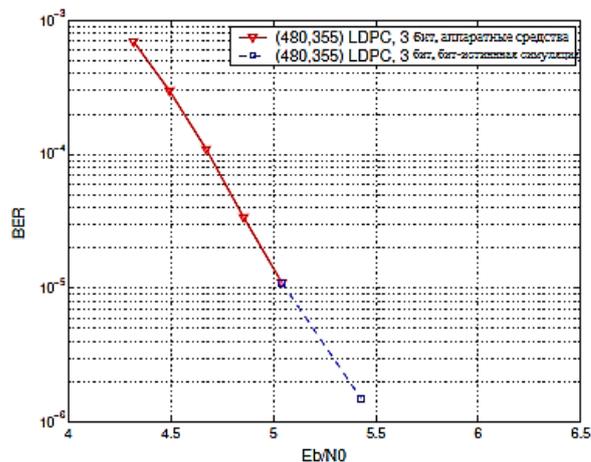


Рис. 7. Аппаратные результаты BER для ПЛИС и бит-истинная симуляция программного обеспечения

Заключение

В этой статье была представлена бит-последовательная архитектура для полностью параллельного LDPC-декодирования. Представлен полностью параллельный LDPC-декодер на основе ПЛИС с пропускной способностью 650 Мбит/с, основанный на представленных выше идеях, который является самым быстрым LDPC-декодером из встречающихся на сегодняшний момент в открытой литературе.

Литература

1. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: учеб. пособие; под ред. Ю.Б. Зубарева. М.: Справочное издание, 2004. 126 с.
2. Свиридова И.В., Башкиров А.В., Андреева Д.С. Эффективная архитектура на основе ПЛИС для полностью параллельного стохастического LDPC-декодера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 101-107.
3. Свиридова И.В., Башкиров А.В. Реализация стохастического LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 103-107.
4. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации не двоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.

Поступила 02.04.2019; принята к публикации 06.06.2019

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Свиридова Ирина Владимировна - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Хорошайлова Марина Владимировна – ассистент, Воронежский государственный технический университет, (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

SERIAL LDPC DECODER WORKING FOR MIN-SUM ALGORITHM AND ITS IMPLEMENTATION ON FPGA

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article discusses the bit-serial LDPC decoder scheme for reducing the complexity of interconnects in fully parallel codes with a low density of parity checks. Bit-sequential decoding also facilitates the efficient implementation of spatially programmable LDPC decoding, which is necessary for decoding a shift program. To simplify the implementation of decoding with a bit sequence, this article proposes a new approximation to the min-sum update function of the decoding algorithm. The new check update rule calculates only the absolute minimum and, if necessary, corrects outgoing messages. Also the 650 Mbps bit-serial (480, 355) LDPC decoder is presented based on the Reed-Solomon code, implemented on the Altera Stratix EP1S80 FPGA. This is the fastest FPGA-based LDPC decoder reported in the literature. The article describes the internal architecture for the hardware-sequential implementation of bit variables and test nodes. It is also discussed that in the modified MS algorithm only the smallest value among all the test inputs should be found

Key words: min-sum decoding, LDPC decoder, bit-serial computation

References

1. Zolotaryev V.V., Ovechkin G.V., ed. Yu.B. Zubarev "Interference-free coding. Methods and algorithms: Manual" ("Pomek-houstoychivoe kodirovanie. Metody i algoritmy: ucheb. posobie"), Moscow, Spravochnoe izdanie, 2004, 126 p.
2. Sviridova I.V., Bashkirov A.V., Andreeva D.S. "Effective FPGA-based architecture for a fully parallel stochastic LDPC decoder", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 101-107.
3. Sviridova I.V., Bashkirov A.V. "Implementation of a stochastic LDPC decoder on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 6, pp. 103-107.
4. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no 5, pp. 70-73.

Submitted 02.04.2019; revised 06.06.2019

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Marina V. Khoroshaylova, Assistant, Voronezh State Technical University, (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel. 8-910-732-66-13, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ С МОЩНЫМИ СВЕТОДИОДАМИ

А.С. Кушнарёв, О.Ю. Макаров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в настоящее время в радиоэлектронных устройствах соответствующего назначения (светотехнические, сигнальные и т.д.) широкое применение находят мощные светодиоды, которые характеризуются значительным тепловыделением, при этом особенности их конструкции и установки в устройствах (обеспечение открытого доступа к излучаемой поверхности) значительно усложняют реализацию эффективного теплоотвода от таких элементов. Современные подходы к упрощению их конструкции, например разработка бескорпусных вариантов, также требуют новых решений для обеспечения нормального теплового режима. Во многом главной проблемой является эффективность отвода тепла от светодиода на внешний радиатор через печатную плату. Поэтому следует использовать печатные платы на алюминиевом основании, в которых важную роль играет слой диэлектрика. От этого слоя зависит эффективность переноса тепла от светодиода на основание печатной платы, поэтому многие производители используют разные материалы в качестве диэлектрика. Так появилась новая технология, называемая алюмооксидной. Рассматриваются задачи анализа и обеспечения теплового режима для бескорпусных мощных светодиодов в осветительных устройствах. Приведены примеры теплового моделирования печатных плат с использованием различных материалов в качестве диэлектрика

Ключевые слова: светодиод, печатные платы, диэлектрик, моделирование

Введение

В настоящее время в связи с миниатюризацией электронных устройств, растущим тепловыделением отдельных компонентов появляется необходимость в более эффективных методах теплоотвода. Одним из наиболее широко используемых и экономичных способов является установка радиатора на перегревающийся компонент (или компонента на радиатор), что увеличивает площадь лучистого и конвекционного обмена. Но эффективность теплоотвода будет зависеть от величины контактного теплового сопротивления корпус-радиатор $R_{т к-р}$ [1].

В связи с особенностью конструкции и применения светодиодов, а именно, необходимостью обеспечить открытый доступ к излучаемой поверхности, возникают сложности с применением традиционных и распространенных способов и устройств теплоотвода. К тому же вследствие особенности конструкции проблематично обеспечить низкое значение $R_{т к-р}$ чисто механическим путем, как это делается для других мощных компонентов в металлических и пластмассовых корпусах (транзисторы, диоды, тиристоры и т.д.). Поэтому актуальной является задача применения других методов и средств теплоотвода в устройствах с использованием мощных светодиодов.

Перспективным в этом случае способом, связанным с развитием современных технологий конструирования и изготовления печатных плат (ПП), является использование плат на материале с высокой теплопроводностью. В подавляющем большинстве случаев это металлические пластины, ламинированные через слой диэлектрика медной фольгой. Данный способ, позволяющий также дополнительно улучшать тепловой режим и путем изменения топологии платы, является наиболее целесообразным и будет рассмотрен в качестве основного.

Конструкция современных и перспективных светодиодов

На данный момент одним из главных направлений применения светодиодов - освещение с использованием мощных и, соответственно, тепловыделяющих компонентов [1].

Для мощных светодиодов одним из важнейших параметров является значение теплового сопротивления. На рис. 1 показано развитие конструкции светодиодов исходя из их теплового сопротивления. Чем выше мощность светодиода, тем меньшим тепловым сопротивлением должна обладать его конструкция.

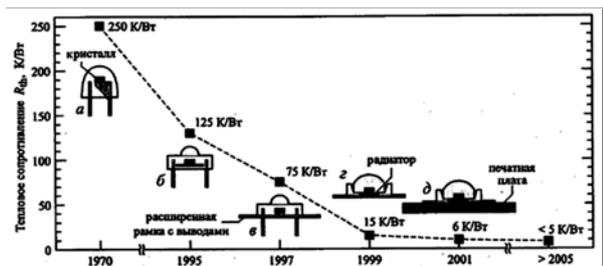


Рис. 1. Тепловое сопротивление различных корпусов светодиодов

В данной работе в качестве таких современных компонентов рассматривались светодиоды фирмы южнокорейской компании Seoul Semiconductor, которая запустила производство светодиодов семейства WICOP (Wafer Level Integrated Chip on PCB) [2]. Компания развила технологию полупроводниковых компонентов, что позволило выращивать структуру светодиода на прозрачной основе из искусственного сапфира (рис. 2). Благодаря этому появилась возможность уменьшить толщину n-слоя и разместить оба электрода на стороне, обращенной к монтажной плате [2]. В итоге излучение идет главным образом через лицевую поверхность чипа, хотя свечение боковых поверхностей также присутствует, но отражателя для него не предусмотрено.

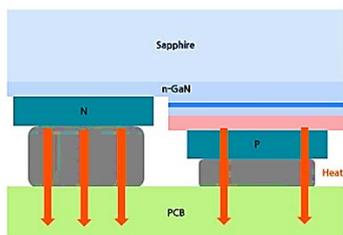


Рис. 2. Структура светодиода WICOP2 от фирмы Seoul Semiconductor

Методика обеспечения тепловых режимов

На основе проведенного анализа была предложена методика обеспечения нормальных тепловых режимов устройств с применением мощных бескорпусных светодиодов, которая включает в себя следующие этапы:

- выбор материалов и конструкции печатной платы;
- разработку топологии платы с учетом тепловых критериев;
- моделирование температурных полей.

Алгоритм методики представлен на рис. 3. Он включает в себя следующие основные этапы: анализ требований ТЗ, после разработка 3D-модели устройства и задание условий

моделирования. Затем расчет теплового режима, если условия технического задания выполнены, то считается, что поставленную задачу решить удалось, в противном случае необходим анализ результатов и повторное моделирование с новыми параметрами.

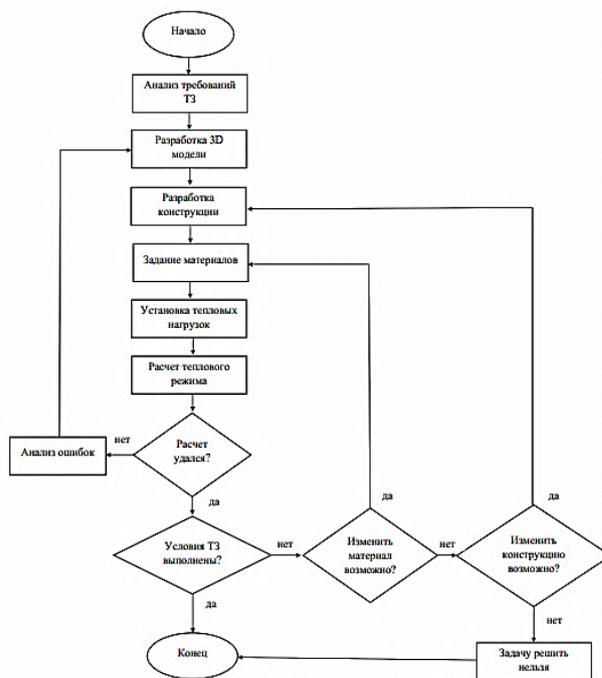


Рис. 3. Алгоритм обеспечения теплового режима компонентов

Выбор материалов

В качестве объекта проектирования и исследования рассматривалась печатная плата на алюминиевом основании с различными материалами в качестве диэлектрического слоя. Данная печатная плата используется в осветительном устройстве мощностью до 90 Вт. Такой мощности удастся добиться за счет компактной установки нескольких светодиодов. В качестве корпуса, а также и радиатора, используется алюминиевый экструзионный профиль. Данные осветительные устройства эксплуатируются в умеренно холодном климате (УХЛ), что накладывает определенные сложности при работе устройства при температуре выше +30⁰С, так как нагревается корпус еще и от солнечного света.

Ввиду дешевизны и хороших теплопроводных свойств чаще всего используются платы на алюминиевом основании. Нужный материал выбирается в зависимости от требуемых характеристик. Самыми используемыми являются такие алюминиевые сплавы [3]:

- 1100 (отечественный аналог сплав АД) – этот материал обладает хорошей теплопроводностью (220 Вт/м·К) из-за небольшого количества примесей, также он пластичен. К недостаткам данного материала можно отнести вязкость и невысокую механическую прочность, что ухудшает механическую обработку контура печатной платы.

- 5052 (отечественный аналог сплав АМг2,5) – наиболее используемый материал, несмотря на меньшую теплопроводность (140 Вт/м·К), зато этот материал хорошо обрабатывается и имеет низкую стоимость.

- 6061 (отечественный аналог сплав АД33) – данный сплав обладает повышенной механической прочностью и применяется, когда требуется высокая коррозионная стойкость. Недостатком является высокая стоимость относительно рассмотренных материалов.

В случаях, когда требуется очень высокая теплопроводность, то используют в качестве металлического основания медь (390 Вт/м·К), но у данного материала имеются трудности механической обработки фрезерованием из-за высокой вязкости, а также очень высокая цена.

Также влияние оказывает и толщина алюминиевого основания. Например, в зависимости от разной толщины будет изменяться параметр теплового сопротивления. На рис. 4 показана зависимость теплового сопротивления от толщины алюминиевого основания с диэлектрическим слоем из материала НА 50 Type 1 [4].

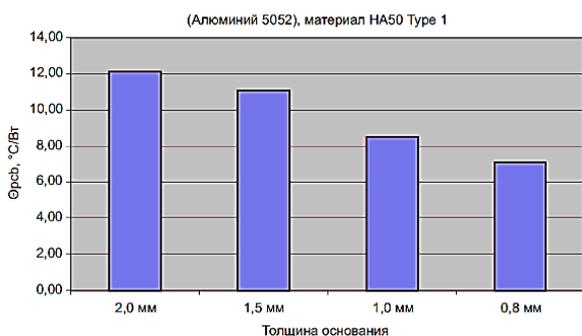


Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления от толщины алюминиевого основания

Как видно из рис. 4, при меньшей толщине основания уменьшается и тепловое сопротивление, следовательно, лучше происходит перенос тепла с печатной платы на радиатор.

Между металлическим основанием и медной фольгой находится слой диэлектрика толщиной от 18 до 350 мкм. На практике чаще все-

го используются материалы с толщиной 75-100 мкм. В качестве диэлектрика могут быть использованы [3]:

- препреги FR4 (стеклоткань с эпоксидным связующим);
- препреги на основе стеклоткани и эпоксидной смолы с теплопроводящим наполнителем;
- теплопроводящие композитные материалы;
- полиамид.

Свойства готового материала и, соответственно, печатной платы в значительной мере зависят от свойств диэлектрика. Наиболее экономичным и доступным решением являются препреги FR4, однако обладают низкой теплопроводностью. Толщина такого диэлектрика составляет 75 мкм, а тепловое сопротивление около 1,42 К/Вт.

Для решения проблемы отвода тепла применяют специальные теплопроводящие материалы из полимеров на основе керамики, толщина такого слоя диэлектрика находится в пределах от 75 мкм до 150 мкм, а тепловое сопротивление равняется от 0,45 К/Вт до 1,0 К/Вт.

Компания «Резонит» изготавливает платы с теплопроводящим материалом T111 и T112 компании Totking, а также HA50-Type3 и HA50-Type4 от компании Zhejiang Huazheng [3].

Кроме того, недавно появилась новая технология, называемая алюмооксидной. Подложки, произведенные по алюмооксидной технологии, состоят из двух основных частей: проводящих слоев алюминия и/или меди и диэлектрического материала, имеющего нанопористую структуру (рис. 5).

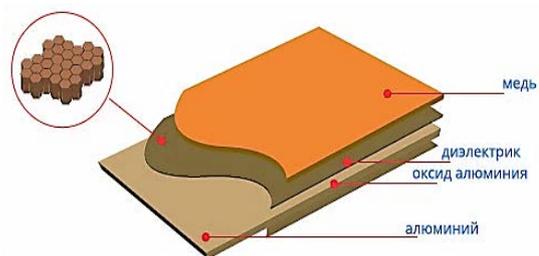


Рис. 5. Структура печатной платы с оксидированием алюминия

Именно благодаря этому слою диэлектрика удалось достигнуть высокой теплопроводности более 120 Вт/(м·К), что значительно превышает показатели стандартных печатных плат с металлическим основанием (МСПСВ), где теплопроводность, как правило, составляет 1-2

Вт/(м·К). Благодаря высокой теплопроводности возможно увеличение плотности монтажа компонентов при сохранении требуемой температуры и производительности [5].

Математическая модель

У современных светодиодов КПД имеет значение около 30-40%, то есть получается, что 60-70% потребляемой мощности преобразуется в тепло [6].

Мощность, которую требуется рассеивать, можно рассчитать по формуле:

$$P_t = 0,75 \cdot V_f \cdot I_f, \quad (1)$$

где P_t – тепловая мощность (Вт);

V_f – прямое падение напряжения на светодиоде (В);

I_f – ток через светодиод (А).

Систему охлаждения светодиодов можно представить в виде эквивалентной схемы последовательно и параллельно подключенных тепловых сопротивлений. В качестве примера для составления эквивалентной цепи можно использовать матрицу из n светодиодов, установленных на печатной плате, которая прикреплена к радиатору (рис. 6).

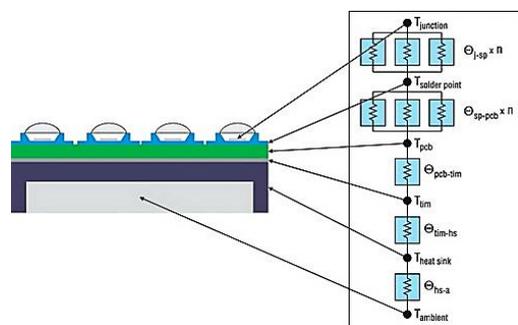


Рис. 6. Эквивалентная схема тепловых сопротивлений

В данном случае эквивалентная схема будет состоять из n тепловых сопротивлений. Первое это «переход светодиода – контакт» (на схеме обозначены как Q_{j-sp}), соединенных параллельно. Второе состоит из n тепловых сопротивлений «контакт – печатная плата» (Q_{sp-pcb}). Также необходимо учесть тепловые сопротивления между печатной платой и теплопроводящим материалом ($Q_{pcb-tim}$), между теплопроводящим материалом и радиатором (Q_{tim-hs}) и, наконец, между радиатором и окружающей средой (Q_{hs-a}). В любом месте этой эквивалентной схемы температуру можно измерить раз-

личными методами, к примеру, в точке $T_{heat\ sink}$ можно измерить температуру радиатора.

Для светильника из одного светодиода, установленного на печатную плату и на радиатор, тепловое сопротивление всех систем охлаждения высчитывается по следующей формуле:

$$Q = Q_{j-sp} + Q_{sp-pcb} + Q_{pcb-tim} + Q_{tim-hs} + Q_{hs-a} \quad (2)$$

Из формулы 2 следует, что чем меньше значение полного теплового сопротивления, тем лучше тепло отводится от светодиода.

Иногда значение температуры не известно, но известна теплопроводность используемых материалов, тогда для нахождения теплового сопротивления можно воспользоваться формулой [1]:

$$Q_t = \frac{h}{\lambda \cdot S}, \quad (3)$$

где h – толщина теплопроводящего слоя, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

S – площадь области теплообмена, м².

Моделирование

Моделирование проводилось в системе инженерного анализа SolidWorks, которая позволяет провести детальное построение и анализ 3D-модели, а также в полной мере промоделировать тепловые нагрузки. Основной задачей моделирования было сравнение теплопроводящих материалов.

Во-первых, анализировалась работа 4 светодиодов с расстоянием между ними 0,3 мм (рис. 7). Тепловое сопротивление между светодиодом и проводящим слоем меди равно 3 К/Вт, данное значение указывает производитель светодиодов. Тепловое сопротивление диэлектрика T111 между слоем медного проводника и алюминием 1,42 К/Вт.

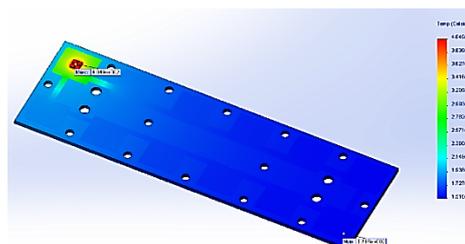


Рис. 7. Расстояние между светодиодами 0,3 мм

При расстоянии между светодиодами 0,3 мм полученная при моделировании максимальная температура составляет 404,9 °С на светодиоде, а самая удаленная точка от теплового элемента является также самой холодной и равняется 151 °С.

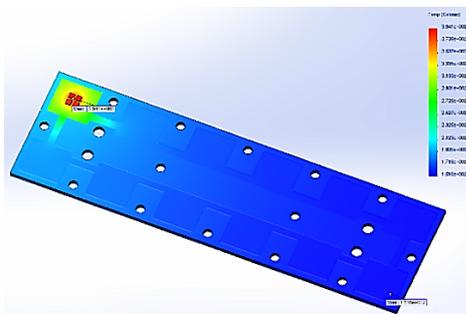


Рис. 8. Расстояние между светодиодами 0,8 мм

При задании расстояния между светодиодами 0,8 мм максимальная температура составляет 394 °С на светодиоде, а самая удаленная точка от теплового элемента является также самой холодной и равняется 151 °С (рис. 8).

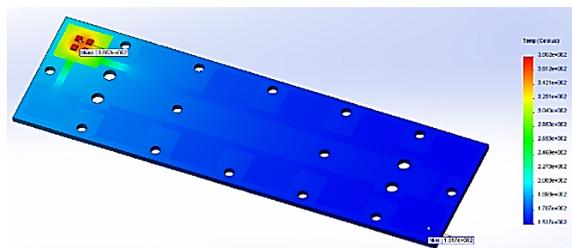


Рис. 9. Расстояние между светодиодами 2 мм

Для сравнения рассматривалось расстояние между светодиодами 2,0 мм, и тогда максимальная температура составила 380 °С на светодиоде, а самая удаленная точка от теплового элемента является также самой холодной и равняется 151 °С (рис. 9).

Рассмотрим, как влияет изменение параметром слоя диэлектрика при изменении значения теплового сопротивления между медным проводником и алюминиевым основанием с 1,42 К/Вт на 0,7 К/Вт, такое значение имеет материал T112. Толщина меди 35 мкм, расстояние между светодиодами 0,8 мм.

При изменении материала диэлектрика на T112 максимальная температура на светодиодах уменьшилась на 50 градусов по сравнению с материалом T111, который имеет тепловые параметры хуже (рис. 10).

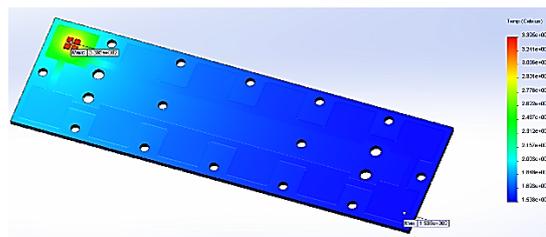


Рис. 10. Моделирование с диэлектриком T112

Также моделировалась температурная зависимость для материала на алюмооксиде, теплопроводность данного материала составляет 12 Вт/м·К, а тепловое сопротивление 0,05 К/Вт.

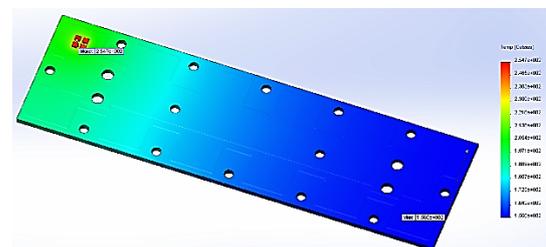


Рис. 11. Влияние на температуру диэлектрика на основе алюмооксида

При задании параметров материала диэлектрика на основе алюмооксида максимальная температура на светодиодах уменьшилась в 2 раза по сравнению с материалом T111 (рис. 11).

По результатам моделирования получается, что новая алюмооксидная технология для печатных плат очень перспективна в радиоэлектронной отрасли при построении устройств с теплонагруженными компонентами. С помощью такого диэлектрика можно добиться высоких результатов в отводе тепла от мощных компонентов, которые с каждым годом становятся только мощнее и, соответственно, с большим количеством выделяемого тепла.

Заключение

Применение предложенной методики показало эффективность использования как печатных плат на алюминиевом основании, так и использование диэлектрика на теплопроводящем материале. Кроме того, использование печатных плат, изготовленных по алюмооксидной технологии, позволяет снизить температуру в 2-3 раза.

Использование предлагаемого подхода (материал платы плюс изменение топологии) и анализ полученных результатов позволят повысить эффективность и качество теплового проектирования соответствующих радиоэлектронных устройств.

Литература

1. Что такое светодиоды и их разновидности: Электр. дан. Режим доступа: <http://elwo.ru/publ/svetodiody/>
2. Королев Г. WICOP2 – революционная технология бескорпусных светодиодов // Lumen&ExpertUnion. 2015. № 7.
3. Справочник инженера-конструктора. М.: ООО «Резонит», 2001. 44 с.
4. Максимов А.Е. Сравнительное исследование теплопроводящих свойств материалов для печатных плат на

алюминиевом основании // Полупроводниковая светотехника: сб. М., 2013. С. 67-70.

5. Алюмооксидная технология производства печатных плат: Электр. дан. Режим доступа: <http://rusalox.ru>.
6. Андреас Поль. Особенности расчета систем отвода тепла при использовании светодиодов в корпусах PLCC // Полупроводниковая светотехника: сб. М., 2010. № 5. С. 54-57.
7. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
8. Прохоренко В.П. Solid Works. Практическое руководство. М.: Бинوم-пресс, 2006. С.512.

Поступила 09.04.2019; принята к публикации 07.06.2019

Информация об авторах

Кушнарёв Александр Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Sanchoyskushnarev@mail.ru

Макаров Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: moy230@yandex.ru

METHODOLOGY OF OPTIMIZING THERMAL REGIMES OF RADIOELECTRONIC DEVICES WITH POWERFUL LED

A.S. Kushnaryev, O.Yu. Makarov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: nowadays, high-power LEDs are widely used in electronic devices of the appropriate purpose (lighting, signaling, etc.), which are characterized by considerable heat generation, while the features of their design and installation in devices (ensuring open access to the radiated surface) make it difficult to remove heat from such elements. Modern approaches to simplify their design, such as the development of unpackaged options, also require new solutions to ensure a normal thermal regime. In many ways, the main problem is the efficiency of heat removal from the LED to the external radiator, through a printed circuit board. Therefore, one should use printed circuit boards on an aluminum base, in which the dielectric layer plays an important role. In many ways, the efficiency of heat transfer from the LED to the base of the printed circuit board depends on this layer; therefore, many manufacturers use different materials as dielectric. So a new technology, called alumina, appeared. This article discusses the problem of analyzing and providing thermal conditions for unpackaged high-power LEDs in lighting devices. Examples of thermal modeling of printed circuit boards using various materials as dielectric are given

Key words: LED, printed circuit boards, dielectric, modeling

References

1. “What are LEDs and their varieties” (“Chto takoe svetodiody i ikh raznovidnosti”), available at: <http://elwo.ru/publ/svetodiody/>
2. Korolev G. “WICOP2 - the revolutionary technology of unpackaged LEDs”, Lumen&ExpertUnion, 2015, no. 7.
3. “Reference book of an engineer designer” (“Spravochnik inzhenera konstruktora”), Moscow, Ltd «Rezonit», 2001, 44 p.
4. Maksimov A.E. “Comparative study of the heat-conducting properties of materials for printed circuit boards on an aluminum base”, *Semiconductor lighting engineering: coll. papers (Sb. poluprovodnikovaya svetotekhnika)*, Moscow, 2013, pp. 67-70.
5. “Aluminum oxide production technology of printed circuit boards” (“Alyumooksidnaya tekhnologiya proizvodstva pechatnykh plat”), available at: <http://rusalox.ru>.
6. Paul A. “Features of the calculation of heat removal systems when using LEDs in PLCC packages”, *Semiconductor lighting engineering: coll. papers (Sb. poluprovodnikovaya svetotekhnika)*, Moscow, 2010, no. 5, pp. 54-57.
7. Dul'nev G.N. “Heat and mass transfer in electronic equipment” (“Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature”), Moscow, Vyssh. shk., 1984, 247 p.
8. Prokhorenko V.P. “Solid Works”, Moscow, Binom-press, 2006, 512 p.

Submitted 09.04.2019; revised 07.06.2019

Information about the authors

Aleksandr S. Kushnaryev, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: Sanchoyskushnarev@mail.ru

Oleg Yu. Makarov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КОМПЛЕКСУ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕПЛОВОЙ ЗАМЕТНОСТИ ОБЪЕКТОВ

М.Г. Калашников, В.Г. Керков, Г.Л. Тюрин

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Аннотация: статья посвящена исследованию характеристик радиотепловой заметности объектов для их защиты от боеприпасов с радиотепловыми (радиометрическими) системами наведения и прицеливания. Эти боеприпасы являются высокоточными средствами поражения наземной техники, эффективность которых зависит от радиотеплового контраста объекта поражения. Это определяет актуальность измерения характеристик радиотепловой заметности потенциальных объектов поражения с верхней полусферы. Рассматриваются принципы построения измерительно-моделирующего комплекса для исследования характеристик радиотепловой заметности объектов с верхней полусферы в миллиметровом диапазоне длин волн. Приводятся блок-схема измерительно-моделирующего комплекса, его основные характеристики и варианты размещения. Показано, что наиболее целесообразно размещать измерительный модуль в закрытом помещении с раздвижной крышей и перемещать его на продольной балке-сканнере или сканнере арочного типа. Измерительный модуль должен включать соосно соединенные радиометрические приемники 3-х и 8-ми миллиметровых диапазонов длин волн. Перемещение измерительного модуля по сканнеру должно обеспечиваться в диапазоне углов возможного наблюдения объекта боеприпасами с воздуха. Управление измерительным модулем, а также обработка информации осуществляются программно с пульта, размещаемого в том же помещении, где и измерительный модуль

Ключевые слова: высокоточное оружие, радиотепловая заметность объектов, измерительно-моделирующий комплекс, вариант размещения

Введение

Анализ состояния и перспектив развития систем высокоточного оружия (ВТО) показывает [1], что в настоящее время на различных стадиях разработки и внедрения находятся боеприпасы ВТО с радиотепловыми (радиометрическими) системами наведения и прицеливания миллиметрового диапазона длин волн.

Независимо от используемых средств доставки боеприпасов к объектам поражения, они могут быть разделены по способу управления на два класса: боевые элементы точного наведения (БЭТН) и боевые элементы точного прицеливания (БЭТП).

Ниже приводятся алгоритмы функционирования типовых представителей данных боеприпасов – БЭТН типа TGSM и БЭТП типа SADARM.

БЭТН TGSM могут быть доставлены в район размещения групповой цели оперативно-тактическими ракетами (ОТР) АТАСМС, реактивными системами залпового огня MLRS и др. по баллистической траектории [1]. На заданной высоте (порядка 500-1000 м) БЭТН TGSM разбрасываются над районом сосредоточения групповой цели по определённому закону. При

этом из хвостовой части каждого БЭТН вытягивается тормозной парашют, обеспечивающий его стабилизацию и ориентацию головной части вертикально вниз, а также уменьшение скорости снижения до 150 м/с и скорости вращения до 10 об/с. После этого тормозной парашют отбрасывается, а у БЭТН раскрываются хвостовые рули и аэродинамические поверхности крыла. Также путём подрыва пиропатрона приводится в рабочее состояние газоструйная система коррекции траектории, после чего радиометрическая головка самонаведения (РМГСН) начинает обзор земной поверхности. Ось антенны РМГСН в начале поиска отклонена от оси БЭТН на угол 5 град, и по мере снижения угол отклонения уменьшается до нуля. При этом за счёт вращения ракеты вокруг продольной оси осуществляется сканирование местности лучом РМГСН БЭТН по скучивающейся спирали.

При обнаружении цели РМГСН обеспечивает наведение БЭТН на цель. Поражение цели осуществляется за счёт подрыва кумулятивных зарядов тандемной боевой части.

БЭТП типа SADARM доставляются в район цели артиллерийским боеприпасом [1]. На высоте 800...600 м срабатывает взрыватель и БЭТП выбрасываются из кассетного боеприпаса. С помощью специального тормозного

устройства замедляется вращение БЭТП, после чего на высоте около 150 м раскрывается ленточный парашют и БЭТП начинает спускаться со скоростью 9...15 м/с, вращаясь вокруг вертикали с частотой 4 об/с. Благодаря специальной подвеске ось БЭТП отклонена от вертикали спуска на угол $\varphi=30$ град (см. рис. 1). В силу этого обстоятельства система поиска цели, состоящая из радиометрического датчика (РМД), сканирует местность по скручивающейся спирали. При обнаружении цели датчиком БЭТП типа SADARM производится нацеленный отстрел боевой части «ударное ядро» в сторону обнаруженной цели.

Боеприпасы TGSM, SADARM и им подобные обладают высокой боевой эффективностью и способны поражать одиночную наземную цель с вероятностью 0,8...0,85 [1]. Защита объектов от таких боеприпасов может быть обеспечена путем снижения их радиотепловой заметности за счёт применения радиопоглощающих (радиорассеивающих) материалов и покрытий.

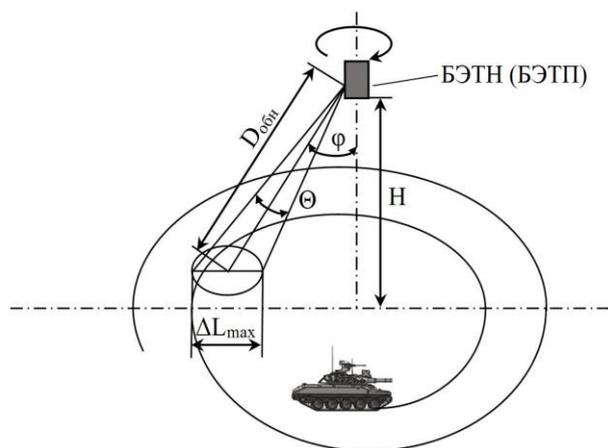


Рис. 1. Принцип обнаружения цели боевыми элементами ВТО

При этом для обеспечения эффективной защиты объектов, а также обоснования требований к радиопоглощающим материалам и покрытиям требуется измерение радиотепловых контрастов защищаемых объектов.

Целью статьи является обоснование требований к измерительно-моделирующему комплексу (ИМК) для исследования характеристик радиотепловой заметности объектов.

Обоснование требований

Исходя из особенностей применения БЭТН и БЭТП, описательные модели которых приведены в [1], требования по угловым и частотным

диапазнам измерения характеристик радиотепловой заметности следующие:

рабочая частота (длина волны) – 94 ГГц (3,2 мм); 35 ГГц (8,6 мм);

углы зондирования объектов:

по азимуту – 0...360 град;

по углу места – 30 град...90 град.

Открытым остается вопрос предъявления требований к разрешающей способности и измеряемому диапазону температур измерительных комплексов в радиотепловом диапазоне длин волн.

При обосновании требований к разрешающей способности измерительного комплекса в радиотепловом диапазоне длин волн считается, что она определяется линейными размерами пятна, формируемого главным лучом диаграммы направленности антенны (ДНА) РМГСН БЭТН или РМД БЭТП на дальности обнаружения типовой цели.

В табл. 1 приведены основные тактико-технические характеристики (ТТХ) радиометрических систем управления (РМСУ) БЭТН TGSM и БЭТП SADARM [1], необходимые для обоснования требований к разрешающей способности измерительного комплекса в радиотепловом диапазоне длин волн.

Таблица 1
Основные ТТХ радиометрических систем управления типовых боеприпасов

Тип боеприпаса	Длина волны, мм	Дальность обнаружения, $D_{обн}$, м	Максим. угол отклонения антенны при поиске φ , град	Ширина ДНА, Θ , град	Носитель боеприпаса (средство доставки)
TGSM	3,2	500-1000	5	2,2	ОТР АТАСМС, 240 мм реактивный снаряд РС30 MLRS
SADARM	8,6	150	30	3,6...4,3	Артиллерийский снаряд 203,2 мм

След главного луча ДНА РМГСН БЭТН и РМД БЭТП на поверхности Земли с учетом его наклона от нормали на угол φ представляет собой эллипс с осями размером:

$$\Delta L_{\max} = D_{обн} \cos \varphi \left[\operatorname{tg} \left(\varphi + \frac{\Theta}{2} \right) - \operatorname{tg} \left(\varphi - \frac{\Theta}{2} \right) \right],$$

$$\Delta L_{\min} = 2D_{обн} \operatorname{tg} \frac{\Theta}{2}.$$

Исходя из вышеизложенного, с учетом данных, приведенных в табл. 1, можно считать, что разрешающая способность радиометрических систем ВТО на дальности обнаружения объектов военной техники составляет:

на длине волны 3,2 мм – 19...38 м;

на длине волны 8,6 мм – 30 м.

Из приведенных в табл. 1 ТТХ следует, что угловое разрешение систем наведения ВТО в радиотепловом диапазоне длин волн составляет не более 2-3 град. В то же время технические характеристики существующей аппаратуры измерения радиотепловых характеристик объектов существенно выше. Поэтому целесообразно в качестве требований к угловому разрешению принять значение, обеспечиваемое существующей измерительной аппаратурой, равное 1 град.

Требования к диапазону измеряемых температур могут быть заданы из следующих соображений. Средний контраст для большинства объектов на фоне земной поверхности составляет 100...120 К [3].

Исследования, проведенные в работе [2], показали, что при контрасте объекта равном 5 К вероятность его обнаружения равна 0,2, а при контрасте в 3 К становится меньше 0,1. Поэтому целесообразно в качестве разрешающей способности по температуре задаться значением 1 К, что позволит рассчитать вероятность обнаружения объекта с точностью 0,05...0,1, а диапазон измеряемых температур задать от 1 до 200 К.

Наиболее близким прототипом, имеющим характеристики, соответствующие требуемым, является измерительный комплекс, описание которого приведено в [3].

Измерительный комплекс построен на базе высокочувствительных радиометрических приемников 8 мм и 3 мм диапазонов длин волн, набора измерительных антенн и прецизионного опорно-поворотного устройства. В его состав также входят тестовые генераторы для проведения измерения диаграмм направленности и юстировки антенн.

Радиометрические комплексы миллиметрового диапазона представляют собой модуляционные радиометры с цифровой обработкой данных на выходе квадратичного детектора. Применение развитой цифровой обработки данных позволяет в несколько раз повысить скорость сканирования без существенного ухудшения чувствительности и точности определения радиояркостного контраста.

Конструктивно приемная часть комплекса состоит из общего низкочастотного (НЧ) блока с источником питания и сменных модулей сверх-

высокой частоты (СВЧ) 8 мм и 3 мм диапазонов длин волн. Блок-схема изображена на рис. 2.

Особенностью СВЧ модуля 8 мм диапазона является наличие транзисторного СВЧ усилителя перед входом смесителя. Смеситель модуля 3 мм диапазона работает в субгармоническом режиме. Для повышения стабильности работы радиометров СВЧ блоки помещены в термостат с рабочей температурой 323 К.

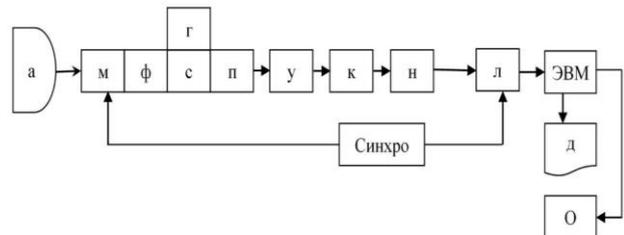


Рис. 2. Блок-схема радиометра, где обозначено: а – антенна; м – модулятор; ф – ферритовая развязка; с – смеситель; г – гетеродин; п – предварительный усилитель промежуточной частоты; у – усилитель промежуточной частоты; к – квадратичный детектор; н – усилитель низкой частоты; л – плата сбора и оцифровки данных; Синхро – устройство синхронизации; ЭВМ – компьютер; д – обработанные данные; О – опорно-поворотное устройство

Выходной НЧ сигнал радиометра и синхро-сигналы поступают на вход цифрового синхронного детектора. В качестве последнего используется плата аналогового ввода. В состав платы входит 12 разрядный аналого-цифровой преобразователь, работающий на частоте 500 кГц и цифровой сигнальный процессор ADSP 2105 с тактовой частотой 10 МГц.

Цифровое детектирование осуществляется в сигнальном процессоре путем умножения выходного оцифрованного сигнала радиометра с опорной цифровой последовательностью с последующим суммированием (накоплением) результата в 40 битном сумматоре. Длительность опорной последовательности – 10 мс. Результат суммирования считывается компьютером для дальнейшей обработки.

Опорно-поворотное устройство представляет собой механический двухкоординатный привод с высокоточными шаговыми двигателями. Угловое позиционирование обеспечивается управляющей программой.

Основные параметры радиометрического приемника, антенн и опорно-поворотного устройства, приведенного в работе [3], представлены в табл. 2.

Измерительный комплекс обеспечивает получение двумерного растрового радиоизображения на произвольной угловой сетке с темпом

0,6 с/точка. Например, при сетке 42×42 точки с шагом 0,2 град и временем накопления 0,45 с время измерения составит 19 минут.

Проведенный анализ ТТХ типовых боеприпасов с радиотепловыми (радиометрическими) системами наведения и прицеливания [1], а также характеристик практически реализованного измерительного комплекса [3] позволил обосновать основные требования к комплексу измерения характеристик радиотепловой заметности объектов с верхней полусферы с учетом особенностей решаемой задачи. Она состоит в том, что в боеприпасах с радиотепловыми (радиометрическими) системами наведения и прицеливания используются исключительно одноэлементные (однопиксельные) радиотепловые приемники, то есть поражаемая цель наблюдается как точечный объект и ее радиотепловой (радиояркий) портрет в приемном устройстве не формируется. Это существенно снижает требования к измерительному радиотепловому модулю 3-х и 8-ми мм диапазонов длин волн.

Таблица 2

Основные параметры радиометрического приемника, антенн и опорно-поворотного устройства

<i>Параметры радиометрического приемника</i>	
Флуктуационная чувствительность (время накопления 1 с.)	0,05 К
Диапазон измерения контраста	0...600 К
Минимальное время накопления цифрового синхронного детектора	10 мс
<i>Параметры антенн</i>	
<i>Параболическая антенна Кассегрена высокого разрешения</i>	
Диаметр	500 мм
Ширина основного лепестка диаграммы направленности	0,45 град
Уровень боковых лепестков	18 дБ
<i>Параболическая антенна низкого разрешения</i>	
Диаметр	140 мм
Ширина основного лепестка диаграммы направленности	3 град
Уровень боковых лепестков	20 дБ
<i>Параметры опорно-поворотного устройства</i>	
Диапазон углов:	
по азимуту	+/- 80 град
по углу места	+/- 15 град
Точность углового позиционирования	0,25 угл. мин
Угловая скорость перемещения	6 град/с

Очевидно, что исходя из обеспечения благоприятных условий эксплуатации измерительного комплекса и управления им, наиболее предпочтительным является его размещение в закрытом помещении, при этом должны быть обеспечены условия измерения близкие к реальным.

Из приведенных в табл. 1 ТТХ боеприпасов следует, что измерения необходимо произ-

водить в верхней полусфере в диапазоне углов до плюс-минус 30 градусов от нормали. При этом диаметр пятна, создаваемого главным лучом диаграммы направленности радиометрического приемника на местности, составляет на дальностях обнаружения цели для 3-х мм диапазона 19...38 м, а для 8-ми мм диапазона – 30 м. Такие условия могут быть обеспечены в помещении, позволяющем устанавливать измерительный модуль на высоте 10...12 метров от поверхности.

Исходя из того, что частота вращения боеприпасов при обнаружении цели составляет до 10 оборотов в секунду и учитывая ширину диаграмм направленности их антенн, время нахождения цели в пределах главного луча диаграммы направленности антенны радиометрического приемника будет от 0,7 мс до 2,5 мс. В [4] приведены экспериментальные данные по обнаружению самолетов на стоянках авиационной радиометрической системой 3-х мм диапазона длин волн с высоты 100 м. При этом для времени накопления всего 100 мкс флуктуационная чувствительность приемника составила 1,8 К, а разрешающая способность по углу – 1 град. При этом отмечается «квазиоптическое проявление радиометрического свойства, которое позволяет получить хорошее качество обнаружения даже в плохих погодных условиях».

Выводы

Проведенный анализ позволяет сформировать предпочтительный технический облик измерительного модуля 3-х и 8-ми мм диапазонов длин волн и сделать следующие выводы.

1. Для проведения измерений радиотепловым модулем в требуемом диапазоне условий достаточно размещать его на минимальном удалении (порядка 10...12 м) от поверхности, что вполне достижимо в условиях ангара. При этом измерительный модуль может быть размещен на стационарно укрепленной балкесканиере, возможные варианты размещения измерительных модулей в ангаре рассмотрены ниже (см. п.3 выводов). Для регистрации измерительной информации и управления измерительным модулем потребуется наземное автоматизированное рабочее место оператора.

2. Для имитации реальных средств обнаружения потребуются радиотепловые приемники 3-х и 8-ми мм диапазонов длин волн, соосно зафиксированные между собой с отдельными антеннами низкого разрешения, имеющими для обеспечения на поверхности пятна

требуемого диаметра ширину диаграмм направленности антенн при размещении на высоте 10 м около 75...80 град. Наиболее простым вариантом реализации указанных значений ширины диаграмм направленности являются рупорные антенны миллиметрового диапазона. Для обеспечения измерений в требуемом диапазоне углов относительно нормали с высоты 10 м при применении продольной балки-сканнера (выносной штанги) потребуется перемещение измерительного модуля на плюс-минус 5,8 м относительно объекта с шагом 20 см при дискретности углового измерения 1 град с одновременным доворотом антенн на 1 град. Исходя из достигнутых в [3] вышеприведенных характеристик измерительного комплекса (темп измерения 0,6 с/точка при времени накопления 0,45 с и скорости перемещения поворотного устройства 6 град/с с точностью углового позиционирования 0,25 угл. мин) с учетом необходимости фиксации измерительного модуля в дискретных точках, можно посчитать, что общее время измерения не превысит 2 мин.

3. Для проведения измерений ангар должен иметь раздвижную (съемную) крышу с окном не менее размеров измеряемого объекта для обеспечения радиоярких характеристик объекта и фона, близких к реальным. При этом имитация различных типов фонов может быть обеспечена использованием в качестве подстилающей поверхности разнообразных покрытий с заданными характеристиками. Размещение измерительного модуля в ангаре позволит организовать внутри ангара автоматизированное рабочее место оператора и обеспечить проведение измерений в любое время года. Возможные варианты размещения радиотеплового измерительного модуля в ангаре представлены ниже на рис. 3 и 4. На рис. 3 представлен вариант размещения модуля на продольной балке-сканнере. На рис. 4 показан вариант размещения модуля на поперечно установленном относительно объекта измерения сканнере арочного типа.

Для получения наиболее полной измерительной информации с верхней полусферы возможна реализация комбинированного варианта с возможностью продольного перемещения сканнера арочного типа вдоль ангара по рельсам.

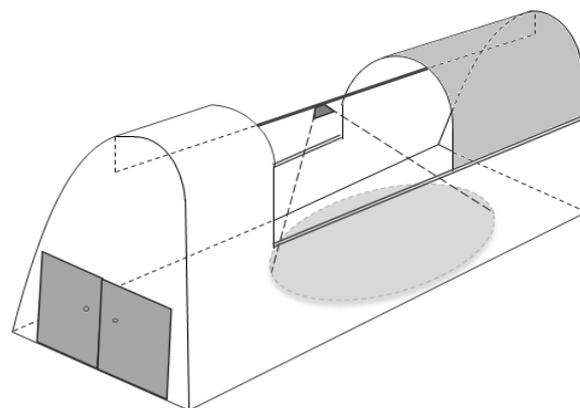


Рис. 3. Вариант размещения радиотеплового измерительного модуля на продольной балке-сканнере

Следует отметить, что ангар относится к легковозводимым строительным сооружениям. Современные технологии позволяют сооружать его в течение нескольких часов путем возведения каркаса нужной формы, обтягивания его материалом нужной прочности и покрытия сверху твердеющей пеной с требуемыми теплоизоляционными свойствами.

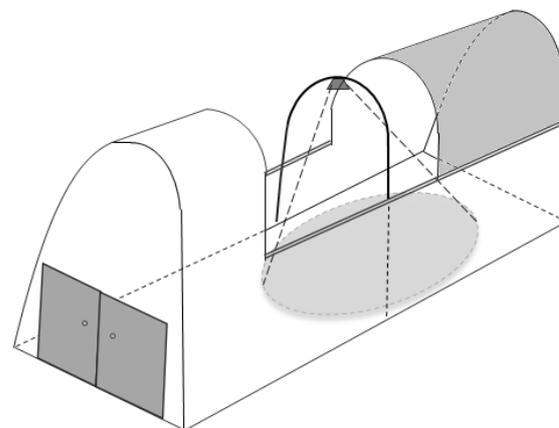


Рис. 4. Вариант размещения радиотеплового измерительного модуля на сканнере арочного типа

Литература

1. ВТО зарубежных стран. Т. 2: Танковые, артиллерийские, миномётные КУВ, самоприцеливающиеся и самонаводящиеся боевые элементы (обзорно-аналитический справочник). КБП. Тула: Власть, 2011. 304 с.
2. Калашников М.Г., Керков В.Г. Оценка возможностей обнаружения объектов в радиотепловом диапазоне длин волн // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 5. С. 51-53.
3. Научный отчет «Измерение радиоярких контрастов в миллиметровом диапазоне». М.: РУФИЛ, 2003. Кн. 1.
4. Peichl M., Dill S., Jirousek M. Microwave Radiometry – Imaging Technologies and Applications, <http://archive.tu-chemnitz.de/pub/2017/>.

Информация об авторах

Калашников Михаил Григорьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(910)348-05-90, e-mail: camigr50@mail.ru

Керков Владимир Георгиевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(980)556-19-71, e-mail: vkerkov@mail.ru

Тюрин Герман Леонидович – канд. техн. наук, начальник отдела, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел.8(908)139-57-58, e-mail: germtyr@yandex.ru

SUBSTANTIATION OF REQUIREMENTS TO THE COMPLEX OF MEASUREMENT OF THE CHARACTERISTICS OF RADIO THERMAL NOTICE OF OBJECTS

M.G. Kalashnikov, V.G. Kerkov, G.L. Tyurin

Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

Abstract: the article is devoted to the study of the characteristics of radiothermal visibility of objects for their protection against ammunition with radiothermal (radiometric) guidance and aiming systems. These munitions are high-precision means of destruction of ground equipment, the effectiveness of which depends on the radio-thermal contrast of the object of destruction. This determines the relevance of measuring the characteristics of radiothermal visibility of potential targets from the upper hemisphere. The principles of constructing a measuring-modeling complex are considered to study the characteristics of the radio-thermal visibility of objects from the upper hemisphere in the millimeter wavelength range. A block diagram of the measuring-modeling complex, its main characteristics and placement options are given. It is shown that it is most expedient to place the measuring module indoors with a retractable roof and move it on a longitudinal beam scanner or an arch-type scanner. The measuring module should include coaxially connected radiometric receivers of 3 and 8 mm wavelength ranges. The movement of the measuring module along the scanner should be provided in the range of angles of possible observation of the object with ammunition from the air. The control of the measuring module, as well as the processing of information, are carried out programmatically from a console located in the same room as the measuring module

Key words: high precision weapons, site radio-thermal perceptibility, measurement and simulation system, layout option

References

1. “HPW of foreign countries: Tank, artillery, mortar KUV, self-aiming and self-induced combat elements (review and analytical reference)” (“VTO zarubezhnyh stran: Tankovue, artilleriyskie, minometnue KUV, samopritselivayushchiesya i samonavodyashchiesya boevue elementy (obzorno-analiticheskiy spravochnik)”), Tula, Vlasta, 2011, vol. 2, 304 p.
2. Kalashnikov M.G., Kerkov V.G. “Evaluation of the possibilities of detecting objects in the radio-thermal wavelength range”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 5.
3. “Scientific report “Measurement of radio brightness contrast in the millimeter range”” (“Nauchnyy otchet «Izmerenie radioyarkostnykh kontrastov v millimetrovom diapazone»”), Moscow, RUFIL, 2003, book 1.
4. Peichl M., Dill S., Jirousek M. “Microwave radiometry – imaging technologies and applications”, available at: <http://archive.tu-chemnitz.de/pub/2017/>.

Submitted 01.04.2019; revised 31.05.2019

Information about the authors

Mikhail G. Kalashnikov, Cand. Sc. (Technical), Senior Scientist, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: camigr50@mail.ru

Vladimir G. Kerkov, Cand.Sc. (Technical), Senior Researcher, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: vkerkov@mail.ru

German L. Tyurin, Cand.Sc. (Technical), Head of department, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: germtyr@yandex.ru

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДАЛЬНЕЙ РАДИОСВЯЗИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕШЕНИЯ ЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**Н.Н. Долженков¹, Д.Г. Пантенков¹, В.П. Литвиненко²,
А.А. Ломакин¹, А.Т. Егоров¹, А.А. Гриценко³**¹АО «Кронштадт», г. Москва, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³ЗАО «Информационный космический центр «Северная корона», г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: в настоящее время в РФ перспективы развития боевой и гражданской беспилотной авиации в интересах соответственно специального и гражданского заказчиков обусловлены целым рядом факторов. Прежде всего, постоянно возрастающей ценой пилотируемых самолетов и вертолетов, ростом стоимости обучения пилотов для них – в то время как для решения достаточно широкого круга задач наличие человека сегодня не является обязательным. Помимо этого, во многих странах мира ведутся активные работы по разработке принципиально новых моделей и конструкций планера беспилотника, который был бы рассчитан на повышенные нагрузки в сравнении с пилотируемой авиацией, а также по оснащению такого рода аппаратов совершенными системами управления для упрощения работы наземного оператора комплекса с БЛА. Не стоит сбрасывать со счетов и человеческую жизнь – самое ценное, что у нас есть. В этом плане использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) – это возможность уменьшения человеческих жертв среди летчиков и автоматизация решаемых целевых задач. С точки зрения обеспечения информационного обмена между БЛА и наземным пунктом управления и обработки информации (НПУОИ) в составе беспилотного летательного аппарата имеются две радиолинии передачи командно-телеметрической и целевой информации – радиолиния прямой видимости и спутниковая радиолиния (загоризонтная радиосвязь) посредством ретрансляции информации между БЛА и НПУОИ через космический аппарат. Поскольку обе указанные радиолинии имеют в своем составе достаточно большое количество общих блоков и функциональных узлов, то актуальным становится вопрос аппаратной оптимизации двух радиолиний в одну с целью уменьшения массогабаритных характеристик, стоимости изготовления и испытаний, унификации в конечном итоге. Данная статья направлена на интеграцию (аппаратное объединение) радиолиний прямой видимости и спутниковой радиолинии в составе КБЛА за счет объединения общих блоков, входящих в состав обоих передающих и приемных трактов

Ключевые слова: комплексы с беспилотными летательными аппаратами, радиолиния, интеграция, космический аппарат, спутниковая радиосвязь, повышение эффективности, радиус действия, целевое назначение

Введение

Основным назначением беспилотных летательных аппаратов большого радиуса действия является мониторинг земной поверхности и окружающего пространства. Полученные данные могут храниться в бортовых накопителях, либо ретранслироваться в реальном или близком к нему масштабе времени на наземный пункт управления. Информационный обмен в пределах зоны радиовидимости между БЛА и НПУ осуществляется по прямым радиоканалам, а на больших расстояниях – по спутниковым радиоканалам.

С целью оптимизации технических решений по обеспечению информационного обмена целесообразно рассмотреть возможность создания интегрированного комплекса средств радиосвязи, позволяющего в зависимости от

выполняемых беспилотными аппаратами задач и расстояния до НПУ организовывать прямые земные и ретрансляционные спутниковые каналы передачи данных.

Состав, технические характеристики и структура бортовой и наземной частей интегрированного комплекса дальней радиосвязи

Комплекс должен состоять из универсального наземного терминала (НТ), работающего в прямом и спутниковом радиоканалах и бортового терминала (БТ) с двумя соответствующими радиочастотными модулями.

При этом, согласно [1], бортовой терминал классифицируется как земная станция фиксированной спутниковой радиосвязи, устанавливаемая на подвижном объекте.

Следовательно, в режиме передачи информации через космический аппарат ретранслятор наземный и бортовой терминалы

являются абонентским оборудованием спутниковой системы радиосвязи.

Для сокращения номенклатуры оборудования наземного терминала в качестве рабочих целесообразно выбрать смежные участки частотных диапазонов спутниковой и подвижной радиосвязи. В наибольшей степени этому требованию удовлетворяют частоты, близкие к спутниковому Ku-диапазону [2].

Таблица 1

Частотный план Ku-диапазона для наземных терминалов спутниковой и подвижной радиосвязи

Частота, ГГц	Вид связи	
	Прием	Передача
14,5 – 14,8	Подвижная связь	
13,75 – 14,5	–	Спутниковая связь стандартный Ku диапазон
10,95 – 12,75	Спутниковая связь стандартный Ku-диапазон	–
10,0 – 10,55	Подвижная связь	

Из данных табл. 1 следует, что универсальный НТ должен работать в расширенном диапазоне со следующими границами:

- на прием 10,0...12,75 ГГц;
- на передачу 13,75...14,8 ГГц.

На рис. 1 представлен вариант частотного плана связи между БТ и НТ по прямому и спутниковому радиоканалам. Входящая стрелка соответствует частотному диапазону приема, а исходящая – передачи.

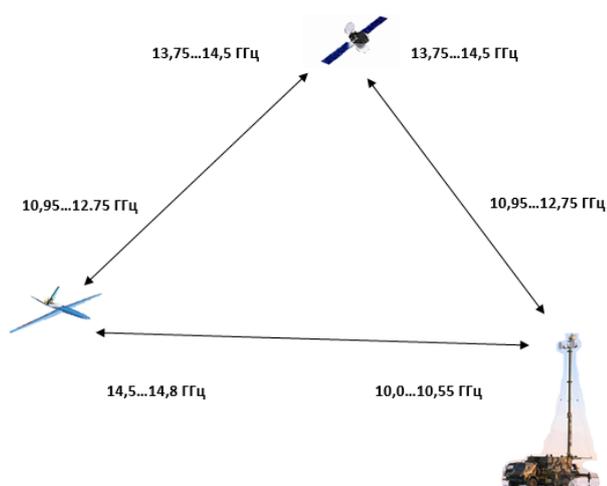


Рис. 1. Вариант частотного плана связи между БТ и НТ по прямому и спутниковому радиоканалам

Смежное расположение спутниковых и земных частотных радиоканалов позволяет ис-

пользовать в НТ единую антенно-фидерную систему.

Информационный трафик между НТ и БТ – несимметричный. От НТ к БТ передается низкоскоростная командная информация. Основные требования к каналу – минимальное время задержки и максимальная устойчивость к естественным и преднамеренно созданным помехам. Время задержки определяется временем распространения радиоволн на трассе и временем обработки при кодировании и декодировании. Для передачи низкоскоростной командной информации целесообразно использовать либо традиционные сверточные коды по алгоритму Витерби, обеспечивающие минимальную временную задержку, либо более современные конструкции типа VersaFEC как компромисс между временем обработки и энергетической эффективностью. Увеличение помехоустойчивости к воздействию преднамеренных помех может достигаться путем расширения спектра радиосигнала.

От БТ к НТ передаются два информационных потока – низкоскоростной телеметрический и высокоскоростной целевой. Требования к помехоустойчивости и задержке в телеметрической радиолинии соответствуют требованиям к передаче командной информации. Аналогичны и способы их реализации.

При передаче высокоскоростных потоков целевой информации основным требованием является энергетическая эффективность. Поэтому для спутникового радиоканала могут быть использованы алгоритмы стандартов DVB-S2(x) или VersaFEC, а для прямого, в условиях многолучевого распространения, предпочтение следует отдать технологии OFDM (DVB-T2), как наиболее устойчивой к межсимвольной интерференции, потери от которой могут достигать 10 дБ. Значительный пик-фактор, свойственный радиосигналу DVB-T2 с множеством ортогональных несущих, компенсируется умеренными требованиями к средней выходной мощности передающего устройства прямого канала.

Способ уплотнения радиосигналов целевой информации и телеметрии выбирается исходя из численности и тактических особенностей применения группировок БЛА. Одновременная работа с несколькими БЛА возможна по спутниковому радиоканалу. В зоне прямой радиовидимости количество обслуживаемых БЛА ограничивается шириной диаграммы направленности антенны НТ.

Энергетические характеристики радиолиний зависят от множества факторов и рассчитываются в каждом конкретном случае. Стандартные методики расчетов изложены в [3-9].

В качестве предварительной оценки могут быть использованы данные, приведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Оценочные характеристики канала прямой радиосвязи

Параметр	Характеристика параметра	
	Командная линия	Информационно-телеметрическая линия
Направление передачи информации	HT - БТ	БТ - HT
Сигнально-кодовая конструкция	Витерби	целевая информация DVB-T2 телеметрия Витерби
Информационная скорость, кбит/с	до 64	целевая информация до 20000
		телеметрия до 64
Наклонная дальность, км	250	
Антенна HT	направленная с апертурой 2,4 м	
Антенна БТ	ненаправленная в азимутальной плоскости	
Выходная мощность, Вт	до 2	10
Учетные потери в атмосфере и осадках при малых углах места, дБ	9	6
Дополнительный энергетический резерв, дБ	22...25	для целевой информации и телеметрии 10...13
		только для телеметрии 32...35

Таблица 3
Оценочные характеристики канала спутниковой радиосвязи

Параметр	Характеристика параметра	
	Командная линия	Информационно-телеметрическая линия
Направление передачи информации	HT - спутник - БТ	БТ - спутник - HT
Сигнально-кодовая конструкция	Витерби	целевая информация DVB-S2(X)
		телеметрия Витерби
Информационная скорость, кбит/с	4,8 - 16	общая - 3000...10000*

Продолжение табл. 3

Антенна HT	направленная с апертурой 2,4 м	
Антенна БТ	направленная с апертурой 60 см	
Выходная мощность, Вт	до 2	50

Примечание: верхняя граница зависит от типа спутника-ретранслятора, зоны полета БЛА и интенсивности осадков.

На рис. 2 приведена упрощенная схема бортового терминала.

БТ состоит из универсального модема и двух радиочастотных модулей, которые устанавливаются на БЛА в соответствии с полетным заданием. Универсальный модем является каналобразующим оборудованием и осуществляет прямые и обратные преобразования в выбранном формате. Дополнительными задачами модема являются уплотнение и расширение спектра радиосигналов. Функции конвертора «вверх» и усилителя мощности выполняет ВУС (Block Upconverter), а малошумящего усилителя и конвертора «вниз» – LNB (Low Noise Block).

Направленная антенна радиочастотного модуля спутникового радиоканала предназначена для радиосвязи с космическим аппаратом-ретранслятором, например, серий «Экспресс» и «Ямал», имеет 3 степени свободы, обеспечивающие ориентацию на спутник в азимутальной и угломестной плоскостях, а также подстройку поляризации при эволюциях БЛА. Наведение направленной антенны может осуществляться двумя способами – пеленгацией радиомаяка космического аппарата и по командам бортовой информационной системы БЛА. Антенна под радиопрозрачным обтекателем располагается в верхней части фюзеляжа БЛА. В ходе выполнения программы полета допускается смена КА-ретрансляторов с целью обеспечения надежности радиосвязи.

Для обеспечения технических характеристик, представленных в табл. 3, радиочастотный модуль спутникового канала должен иметь ЭИИМ не менее 52 дБВт и добротность – плюс 13 дБ/К. Модуль работает в стандартном спутниковом Ku – диапазоне [10-14].

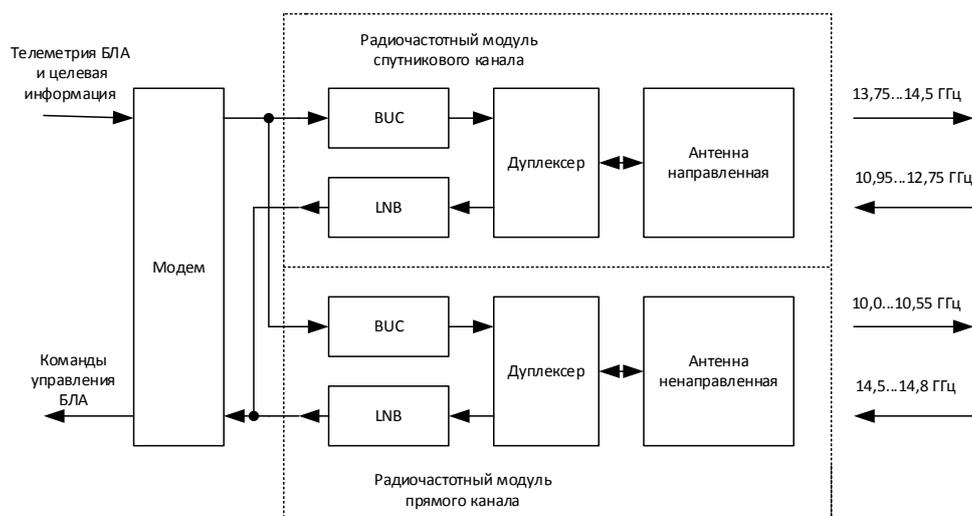


Рис. 2. Упрощенная структурная схема БТ с модулями прямого и спутникового радиоканалов

На рис. 3 показана авиационная малогабаритная антенна спутниковой системы связи «Акцент-СМ». Изделие может являться прототипом модуля спутникового канала.



Рис. 3. Авиационная малогабаритная антенно-фидерная система спутникового канала

Антенна прямого канала предназначена для организации связи в пределах радиогоризонта наземного терминала (до 250 км). Антенна имеет круговую диаграмму направленности в азимутальной плоскости и секторную ($30^\circ - 45^\circ$) в угломестной. Поляризация – линейная неуправляемая.

Антенна стационарно закрепляется в нижней части фюзеляжа БЛА. ЭИИМ модуля прямого канала – 13...14 дБ, а добротность – минус 23 дБ/К. Модуль работает в диапазонах подвижной радиосвязи 10/14 ГГц.

В основе НТ (рис. 4) лежит архитектура земных станций спутниковой радиосвязи. Наземный терминал оборудован двумя антеннами. Одна из них, дальней зоны, диаметром 2,4 м предназначена для связи с БЛА по прямому и спутниковому радиоканалам, а вторая, всенаправленная в верхней полусфере – для обмена командно-телеметрической информацией на расстоянии до 25...40 км.

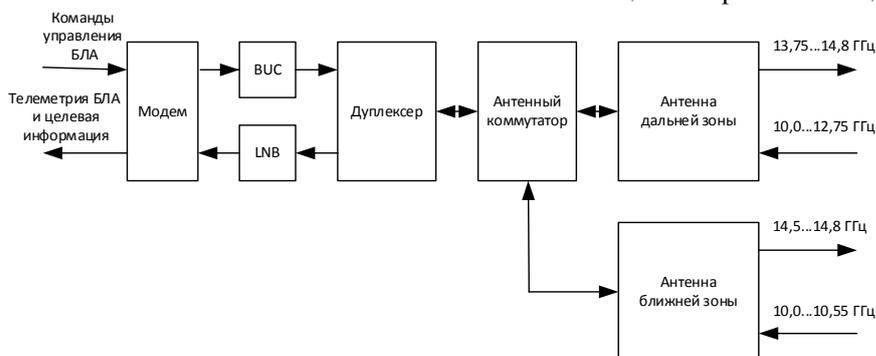


Рис. 4. Упрощенная структурная схема одноканального наземного терминала

Антенна дальней зоны должна быть полноповоротной с автосопровождением, обеспечивать перенацеливание луча по углу места – от 0° до 90°. Для автосопровождения могут использоваться алгоритмы моноимпульсной пеленгации или равносигнального приема.

Основные энергетические характеристики одноканального НТ приведены в табл. 4.

Направленная антенна работает в полном диапазоне частот, включающем в себя спутниковую и подвижную радиосвязь.

Антенна ближней зоны работает только в диапазоне подвижной радиосвязи.

Таблица 4

Основные энергетические характеристики одноканального наземного терминала

Антенна	ЭИИМ, дБВт	Добротность, дБ/К
Направленная	50	29
Ближней зоны	11	минус 26

На рис. 5 представлен внешний вид одной из возможных конструкций направленной антенны.



Рис. 5. Антенный пост Полюс-М-2,4 м

На базе одноканального НТ может быть выполнен модуль управления взлетом и посадкой. В его составе отсутствует направленная антенна и антенный коммутатор. Модуль обеспечивает обмен командно-телеметрической информацией на расстоянии до 25...40 км и прием видеосигнала от БЛА на расстоянии от 3 км.

При необходимости одновременного управления несколькими БЛА наземный терминал может быть многоканальным. Для каждого канала используется собственный модем, который через матрицу коммутируется с одним из двух приемо-передающих трактов, связанных с антеннами ближней и дальней зоны. Соответственно количеству активных каналов должна меняться выходная мощность передающего устройства.

Заключение

Интегрированный комплекс дальней радиосвязи предназначен для обмена информацией между НПУ и БЛА большого радиуса действия со скоростями до 20 Мбит/с. Для сокращения номенклатуры оборудования радиокomплекса прямые и спутниковые радиоканалы работают в смежных участках Ku-диапазона частот и диапазонов частот подвижной радиосвязи. Увеличение помехоустойчивости при передаче командной и телеметрической информации достигается путем расширения спектра радиосигналов.

В состав БТ должны входить универсальное каналообразующее оборудование и сменные приемо-передающие радиочастотные модули прямого и спутникового радиоканалов.

Универсальный наземный терминал обеспечивает работу в прямом и спутниковом радиоканалах. НТ состоит из каналообразующего оборудования, приемо-передающего тракта и двух антенн. Направленная антенна предназначена для работы в дальней зоне прямого радиоканала, а также для обеспечения радиосвязи со спутником-ретранслятором. Антенна с диаграммой направленности в верхней полусфере предназначена для управления БЛА в ближней зоне прямого радиоканала.

Литература

1. Решение Государственной комиссии по радиочастотам при Минкомсвязи России от 2 октября 2012 г. № 12-15-05-6 «Об использовании полос радиочастот в диапазонах 14/11-12 ГГц абонентскими земными станциями спутниковой связи, устанавливаемыми на подвижных объектах» [Электронный ресурс] //Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902376496>.
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2011 г. N 1049-34 «Об утверждении таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации и признании утратившими силу некоторых постановлений правительства Российской Федерации».
3. Боев Н.М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета.

ского университета им. акад. М.Ф. Решетнева. 2012. Вып. 2 (42). С. 86–91.

4. Методический подход оценки компенсации доплеровского смещения частоты в спутниковых линиях информационного обмена при эксплуатации космических систем связи / А.В. Вейко, В.И. Великоиваненко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.С. Константинов, Д.Д. Тюрина // Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов: сб. науч. тр. М.: Филиал ФГУП «ЦЭНКИ»-КБТХМ, 2018. Ч. 1. С. 289-297.

5. Система спутниковой связи с последовательным зональным обслуживанием / В.И. Великоиваненко, Н.В. Гусаков, П.В. Донченко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.М. Соколов // Космонавтика и ракетостроение, 2014. № 2 (75). С. 48-56.

6. Полинкин А.В., Ле Х.Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия ТулГУ. 2013. Вып. 7. Ч. 2. С. 98-107.

7. Рекомендация МСЭ-R P.528-3 (02/2012) Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ.

8. Спутниковая связь и вещание: справочник / В.А. Бартнев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др.; под ред. Л.Я. Кантора. М.: Радио и связь, 1997.

9. Интернет-версия ПО «Бюджет». Режим доступа: info.spacecenter.ru/satellite-budget.php.

10. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Гусаков Н.В. Математическое, численное и электродинамическое моделирование активных фазированных антенных решеток // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 10.2. С.86-90.

11. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Марковская модель случайного процесса // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12.1. С. 23-27.

12. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Гусаков Н.В. Математическое моделирование потенциальной скрытности канала связи в многоканальных радиоприемах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 1. С. 47-49.

13. Пантенков Д.Г., Гусаков Н.В. Компьютерное моделирование активной фазированной антенной решетки // Космическая техника и технологии. 2013. № 1. С. 32-38.

14. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П. Компьютерное моделирование передачи полезной информации в спутниковых радиоприемах при многолучевой связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3.1. С. 127-131.

Поступила 10.04.2019; принята к публикации 11.06.2019

Информация об авторах

Долженков Николай Николаевич – д-р техн. наук, генеральный директор, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), тел. 8(495)230-00-36, e-mail: Nikolay.Dolzhenkov@kronshadt.ru

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, начальник отделения радиосвязного оборудования, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantekov88@mail.ru

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, д. 14), e-mail: litvinvp@gmail.com

Ломакин Андрей Александрович – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshadt.ru

Егоров Александр Тимофеевич – начальник отдела систем радиосвязи, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, д. 18, кор. 9), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshadt.ru

Гриценко Андрей Аркадьевич – канд. техн. наук, генеральный директор, ЗАО «Информационный космический центр «Северная корона» (199034, г. Санкт-Петербург, 17-я линия В.О., д. 4-6), тел. 8(812) 922-36-21, e-mail: org@spacecenter.ru

INTEGRATED COMPLEX OF THE LONG-DISTANCE RADIOCOMMUNICATION FOR INCREASE EFFICIENCY OF THE SOLUTION OF TARGET TASKS BY UNMANNED VEHICLE

**N.N. Dolzhenkov¹, D.G. Pantenkov¹, V.P. Litvinenko², A.A. Lomakin¹,
A.T. Egorov¹, A.A. Gritsenko³**

¹«Kronstadt», Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Closed joint stock company "Information Space Center "Northern Crown", St. Petersburg, Russia

Abstract: currently, in the Russian Federation, the prospects for the development of combat and civil unmanned aircraft vehicle (UAV) in the interests of special and civil customers, respectively, are due to a number of factors. First of all, the ever-increasing price of manned aircraft and helicopters, the rising cost of training pilots for them – while for the solution of a wide range of tasks, the presence of a person today is not mandatory. In addition, in many countries of the world, active work is underway to develop fundamentally new models and designs of the UAV glider, which would be designed for increased loads in comparison with manned aircraft, as well as to equip such devices with perfect control systems to simplify the work of the ground operator of the complex with UAV. We should not discount human life – the most valuable thing we have. In this regard, the use of unmanned aerial vehicles is an opportunity to reduce human casualties among pilots and automatization of the target tasks. From the point of view of ensuring information exchange between the UAV and the ground control and information processing (GCIP), consisting of unmanned aircraft has two radio transmission command telemetry and target data is a

radio link line of sight and satellite radio line through relay of information between the UAV and GCIP through the spacecraft. Since both of these radiolines are composed of a sufficiently large number of common components and functional units, the actual question is the hardware optimization of two radiolines in one with the aim of reducing the weight and size characteristics, the cost of manufacturing and testing, unification in the end. This article is aimed at the integration (hardware Association) of line-of-sight radiolines and satellite radio lines in the structure of complexes with UAV by combining common units that are part of both transmitting and receiving tracks

Key words: complexes with unmanned aerial vehicles, radio line, integration, spacecraft, satellite radiocommunication, increase in efficiency, range, purpose

References

1. "Decision of the State Radio Frequency Commission at the Ministry of Telecom and Mass Communications of the Russian Federation of October 2, 2012 no. 12-15-05-6 "About use of radio frequency bands in the ranges of 14/11-12 GHz the subscriber terrestrial stations of satellite communication set on mobile objects", *Electronic fund legal and the specifications and technical documentation (Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tekhnicheskoy dokumentatsii)*, available at: <http://docs.cntd.ru/document/902376496>.
2. The resolution of the government of the Russian Federation of December 21, 2011 N 1049-34 "About the approval of the allocation table of radio frequency bands between radio services of the Russian Federation and recognition become invalid for some resolutions of the Government of the Russian Federation"
3. Boev N.M. "The analysis of the command and telemetric radio communication line with unmanned aerial vehicles", *Bulletin of the M.F. Reshetnev Siberian State Space University (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akad. M.F. Reshetneva)*, 2012, vol. 2 (42), pp. 86-91.
4. Veyko A.V., Velikoivanenko V.I., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Konstantinov V.S., Tyurina D.D. "Methodical approach of assessment of compensation of the Doppler shift of frequency in satellite links of information exchange at operation of space communication systems", *Coll. of Papers: Problematic Issues of Development of Land Complexes, the Starting Equipment and operation of Aircraft (Problemye voprosy razvitiya nazemnykh kompleksov, startovogo oborudovaniya i ekspluatatsii letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr.)*, Moscow, "TsENKI"-KBTHM, 2018, part 1, pp. 289-297.
5. Velikoivanenko V.I., Gusakov N.V., Donchenko P.V., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Sokolov V.M. "Satellite communication system with consecutive zone service", *Astronautics and Rocket Production (Kosmonavtika i raketostroenie)*, 2014, no. 2 (75), pp. 48-56.
6. Polynkin A.V., Le H.T. "Research of characteristics of a radio channel of contact with unmanned aerial vehicles", *News of Tula State University (Izvestiya TULGU)*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 98-107
7. "Curve radio propagations for the air mobile and radio navigational services working in the ranges of UHF and very high frequency", Recommendations of MSE-R P.528-3 (02/2012)
8. Bartenev V.A., Bolotov G.V., Bykov V.L. et al. "Satellite communication and broadcasting: Reference book" ("Sputnikovaya svyaz' i veshchanie: spravochnik"), ed. L.Ya. Kantor, Moscow, Radio i svyaz', 1997.
9. Internet version of software "Budget", available at: info.spacecenter.ru/satellite-budget.php.
10. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P., Gusakov N.V. "Mathematical, computational and electrodynamic modeling of active implemented phased arrays", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol.8, no. 10-2, pp. 86-90.
11. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. "Markov model of accidental process", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol.8, no. 12-1, pp. 23-27.
12. Pantenkov D.G., Litvinenko V. P., Gusakov N.V. "Mathematical modeling of potential reserve of a communication channel in multichannel radio lines", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol.9, no. 1, pp. 47-49.
13. Pantenkov D.G., Gusakov N.V. "Computer modeling of the active phased antenna lattice", *Space Equipment and Technologies (Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii)*, April-June, 2013, no. 1, pp. 32-38.
14. Pantenkov D.G., Litvinenko V.P. "Computer modeling of transfer of useful information in satellite radio lines at multibeam communication", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol.9, no. 3-1, pp. 127-131.

Submitted 10.04.2019; revised 11.06.2019

Information about the authors

Nikolay N. Dolzhenkov, Dr. Sc. (Technical), General manager, JSC Kronstadt (18 prospekt Andropova, Moscow 115432, Russia), e-mail: Nikolay.Dolzhenkov@kronshtadt.ru
Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), Head of the Department of Radiocommunication Equipment, JSC Kronstadt (18 prospekt Andropova, Moscow 115432, Russia), tel. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru
Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com
Andrey A. Lomakin, Cand. Sc. (Technical), Leading Researcher, Kronstadt (18 prospekt Andropova, Moscow 115432, Russia), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshtadt.ru
Aleksandr T. Egorov, Head of the Department of Radiocommunication Systems of JSC "Kronstadt" (18 prospekt Andropova, Moscow 115432, Russia), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshtadt.ru
Andrey A. Gritsenko, Cand. Sc. (Technical), General Manager, Information Space Center "Severnaya Korona" (4-6, 17 Line V.O., St. Petersburg 199034, Russia), e-mail: org@spacecenter.ru

РАЗРАБОТКА ЕМКОСТНОГО ЭЛЕКТРОДА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Д.В. Журавлев, И.А. Сафонов, И.В. Остроумов, И.С. Анисимов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены особенности разработки ёмкостного электрода, предназначенного для регистрации медико-биологических показателей, путем усовершенствования существующих методов регистрации биопотенциалов с целью повышения качества принимаемого сигнала и сенсорной технологии, не требующей механического или резистивного контактов для проведения замеров, отвечающего тенденциям современного развития радиоэлектронных систем медицинского назначения. Ёмкостные электроды позволят выйти на совершенно новый уровень комфортности и удобства использования биомедицинских измерительных приборов в повседневной жизни, а также позволят существенно экономить средства за счет весьма продолжительного срока использования таких электродов. Полезность бесконтактных электродов заключается в высоком качестве сигнала с точки зрения соотношения сигнал\шум. По сравнению с обычными электродами, разрабатываемые ёмкостные электроды для измерения биоэлектрических сигналов пригодны для использования в условиях очень высокого импеданса (высокое сопротивление, малая емкость) между поверхностью тела и электродом. Модель включает следующие элементы: непосредственно электрод, обеспечивающий бесконтактное считывание биопотенциалов человека через ёмкостную связь; буферный каскад, необходимый для согласования приемной части устройства с последующими каскадами; высокочастотный фильтр с требуемой частотой среза; делитель напряжения в качестве смесителя постоянного напряжения на необходимое значение; активный фильтр, служащий для конечного усиления и низкочастотной фильтрации электрического сигнала

Ключевые слова: устройство регистрации медико-биологических показателей, ЭКГ, ЭЭГ

Введение

Записи биопотенциалов в виде ЭКГ, электроэнцефалограмм (ЭЭГ), электроокулограмм (ЭОГ) и электромиограмм (ЭМГ) являются незаменимыми и жизненно важными инструментами как для медицинской отрасли, так и для исследования. Эти хорошо зарекомендовавшие себя модальности сигналов обеспечивают богатую физиологическую информацию, которая благодаря современной технологии биоинструментации может быть использована неинвазивно и недорого для новых глобальных разработок в области здравоохранения: клинического физиологического мониторинга и лечения [1].

Традиционно электроды Ag/AgCl с влажными проводящими гелями используются для записи биопотенциалов. Стандартный электрод Ag/AgCl хорошо изучен за последние десятилетия. Его свойства понятны и дают прогнозируемые результаты.

Известны также основные принципы, лежащие в основе электродов. Несмотря на десятилетия исследований в области альтернативных биопотенциальных сенсорных технологий [2] для применений ЭКГ и ЭЭГ, стандартный

мокрый электрод Ag/AgCl по-прежнему почти повсеместно используется для клинических и исследовательских применений. Каждый год производятся миллиарды одноразовых адгезивных ЭКГ-клинических электродов, а сухие электроды ограничены нишевыми, немедицинскими/научными приложениями, такими как фитнес-мониторинг и игрушки.

Полезность и производительность сухих и бесконтактных электродов можно разделить на две категории. Первый относится к качеству сигнала устройства с точки зрения шума и чувствительности движения. Во-вторых, поскольку электроды взаимодействуют с кожей, каждый электрод должен быть оправдан для удобства и полезности использования на уровне системы. Одним из главных преимуществ стандартного клинического мокрого электрода является то, что он хорошо прилипает к коже, при этом с точки зрения комфорта пациента для длительного использования они неудобны, клейкие мокрые электроды остаются фиксированными в конкретных, клинически стандартных местах на теле. Сухие и бесконтактные электроды решают проблемы комфорта в связи с использованием адгезивного мокрого электрода, но их гораздо труднее защитить от пациента. Таким образом, для того, чтобы эти технологии были клинически полезными, необходимо разработать механиче-

ские решения для размещения электродов в надлежащем положении. Именно по этим причинам сухие и бесконтактные электроды вряд ли заменят стандартный ЭКГ или ЭЭГ электрод. Сухие электроды были разработаны для измерений без геля, а область их контакта с кожей была выполнена из благородного металла. Изолированные электроды представляют собой электроды, у которых контактная часть с кожей покрыта изоляционным материалом, таким как оксид металла. Изолированный электрод может быть покрыт различными материалами для различных целей, такими как материал, который не вызывает электрохимическую реакцию с кожей человека [3].

Как правило, сухие электроды и изолированные электроды имеют недостаток в виде более низкого качества сигнала по сравнению с гелеобразными электродами. Чтобы преодолеть этот недостаток, в электрод встроен усилитель с высоким входным импедансом.

В отличие от обычных и типичных электродов, разрабатываемые емкостные электроды для измерения биоэлектрических сигналов пригодны в условиях очень высокого импеданса (высокое сопротивление, малая емкость) между поверхностью тела и электродом. В широком смысле емкостный электрод включает все сухие и изолированные типы электродов, а термин «емкостный электрод» используется для обозначения сухого или изолированного электрода. Однако «емкостный электрод» стал обозначать электрод, который используется с наличием толстого изолятора, такого как одежда или промежуток между электродом и кожей. В данной статье термин «емкостный электрод» используется для последнего значения. Емкостный электрод можно отнести к нескольким терминам, таким как «емкостный соединительный электрод» [4] и «бесконтактный электрод».

Понятие об экранированных емкостных электродах. Структура электрода

На рис. 1 показана общая схема емкостного электрода, включающая поверхность электрода, предусилитель и экран. Лицевая часть электрода является проводящей пластиной и воспринимает изменения электрического потенциала на поверхности тела через емкостное сцепление между кожей и поверхностью электрода. Снижение импеданса между кожей и поверхностью электрода полезно для получения хорошего качества сигнала. Поэтому по-

верхность электрода емкостного электрода обычно должна быть такой же большой, как разрешено приложениями [5]. В то же время измеритель биопотенциалов должен быть малогабаритным и компактным.

Предусилитель передает сигнал от емкостной связи с высоким импедансом на следующую ступень с усилителем и фильтром. Поэтому предусилитель действует как импедансный трансформатор и имеет очень высокий входной импеданс. Из-за высокого импеданса между корпусом и электродом, емкостный электрод уязвим для внешнего шума. Чтобы уменьшить этот внешний шум, весь электрод, за исключением поверхности, обращенной к телу, окружен электрическим экраном.

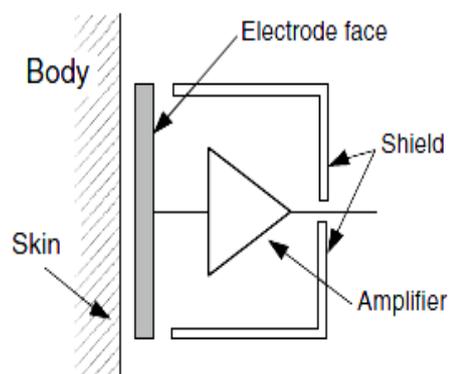


Рис. 1. Общая схема емкостного электрода

Строение предусилителя

Состав предусилителя, встроенного в емкостный электрод, не представляет из себя ничего сложного. В дополнение к центральному активному устройству, например операционному усилителю или FET (*Field Effect Transistor – полевой транзистор*), единственным дополнительным дискретным элементом является резистор (R_B на рис. 2), который становится каналом тока смещения для стабилизации усилителя. C_{SHLD} емкость, показанная на рис. 2, не является фактическим дискретным элементом, а представляет собой паразитную емкость, образованную между поверхностью электрода и экраном.

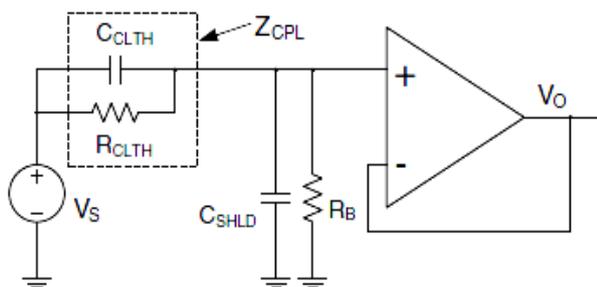


Рис. 2. Схема емкостного электрода с дополнительными элементами

Между электродом и кожей существует емкость (C_{CLTH} на рис. 2), поэтому этот тип электрода называется емкостным электродом. Однако необходимо учитывать компонент сопротивления R_{CLTH} , вносимый одеждой. Поэтому импеданс связи Z_{CPL} между кожей и электродом представлен как параллельное соединение сопротивления и емкости [6].

Коэффициент усиления емкостного электрода, показанного на рис. 2, представлен как:

$$V_0 = \frac{R_B + j\omega C_{CLTH} R_B R_{CLTH}}{R_B + R_{CLTH} + j\omega R_B R_{CLTH} (C_{CLTH} + C_{SHLD})} V_S \quad (1)$$

Уравнение 1 показывает, что коэффициент усиления определяется отношением C_{CLTH} и C_{SHLD} в более высокочастотном диапазоне и отношением R_{CLTH} и R_B в нижнем частотном диапазоне. На рис.3 показан фактический коэффициент усиления емкостного электрода через лист хлопчатобумажной ткани (деним – ткань из натурального хлопка, толщина 0,5 мм). Площадь электрода составляла 15 см^2 , R_B составляла 3 ГОм, а C_{SHLD} составляла 20 пФ. Используя уравнение 1, сопротивление образца ткани на единицу площади может быть оценено приблизительно как $5,5 \text{ Мом/м}^2$ при 0,1 Гц, а емкость на единицу площади может быть оценена как 30 нФ/м^2 при 400 Гц. Однако было замечено, что сопротивление (R_{CLTH}) и емкость (C_{CLTH}) ткани не были постоянными с частотой; кроме того, сопротивление сильно варьировалось в зависимости от уровня влажности в ткани.

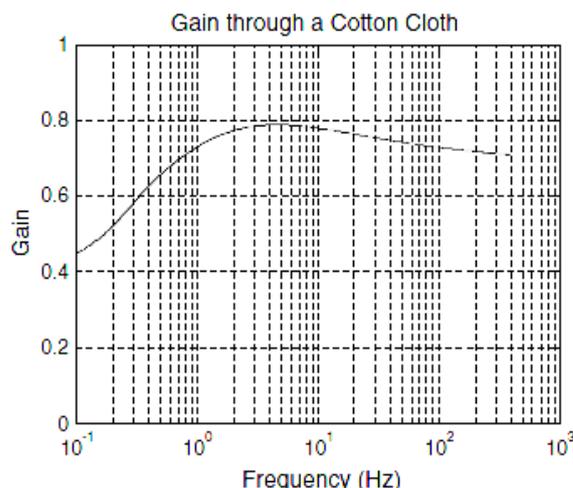


Рис. 3. Коэффициент усиления емкостного электрода через лист хлопчатобумажной ткани

Защита входных данных

С помощью уравнения 1, мы видим, что для получения более высокого коэффициента усиления либо сопротивление R_B должно быть большим, либо емкость C_{SHLD} должна быть малой. Однако нижний предел паразитной емкости определяется формой поверхности электрода и экраном. В некоторых случаях мы не можем сделать R_B достаточно большим из-за ограничений конструкции. При заданных ограничениях на R_B и C_{SHLD} используется защита для увеличения входного импеданса электрода.

Применение защиты к емкостному электроду представлено в качестве предохранителя таким образом, что электрический потенциал экрана и другого конца R_B был обусловлен выходом предусилителя с единичным усилением. Как правило, защитный кожух представляет собой особый корпус щита и управляется некоторым переменным напряжением, в то время как обычный экран соединен с землей или статическим напряжением. Тонкий гибкий электрод демонстрирует очень большое рассеяние емкости; поэтому в этом случае защита важна [7].

Внутренний шум емкостного электрода

В данной электронной цепи существуют два типа неизбежных внутренних источников шума. Один из них – это тепловой шум, создаваемый сопротивлением в цепи, а другой – активный шум устройства, создаваемый активным устройством (транзистором или операци-

онным усилителем) в цепи [8]. Эти два шума определяют минимальный уровень шума для данной схемы. Поэтому необходимо исследовать внутренние шумы емкостного электрода для проектирования электрода с более низким уровнем шума.

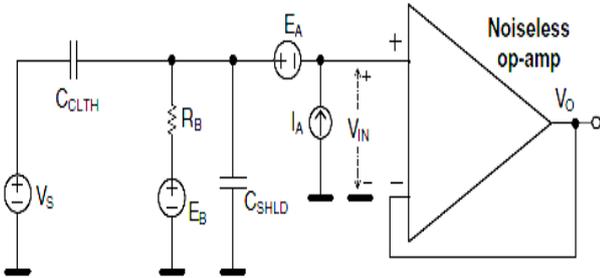


Рис. 4. Внутренние источники шума емкостного электрода

На рис. 4 показаны внутренние источники шума емкостного электрода. Активное устройство представлено в виде композиции источника шума напряжения E_A , источника тока шума I_A и бесшумного операционного усилителя. Тепловой шум, вызванный сопротивлением R_B , представлен как источник шума напряжения E_B . Как правило, подробная информация об источниках шума E_A и I_A предоставляется изготовителем устройства, тогда как E_B описывается как RMS-напряжение (*Root Mean Square – среднеквадратичное значение*) в уравнении 2.

$$V_{rms} = \sqrt{4kTBR}, \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – абсолютная температура (К), B – ширина шума (Гц), а R – сопротивление (Ом).

Напряжение на входе ОУ представляется в виде

$$V_{IN} = G_{GAIN}V_S + V_{INTRINSIC NOISE}. \quad (3)$$

Внутренний шум состоит из трех компонентов, которые исходят из теплового шума R_B , тока источника шума ОУ и источника шума напряжения ОУ. Их спектральные плотности напряжения (ед. изм. $V/\sqrt{Гц}$) получены как:

$$V(f)_{TH.NOISE.VSD} = \sqrt{\frac{4kTR_B}{1 + (C_{SHLD} + C_{CLTH})^2 R_B^2 (2\pi f)^2}}, \quad (4)$$

$$V(f)_{CUR.NOISE.VSD} = \sqrt{\frac{I_{A.SD}(f)R_B}{1 + (C_{SHLD} + C_{CLTH})^2 R_B^2 (2\pi f)^2}}, \quad (5)$$

$$V(f)_{VOLT.NOISE.VSD} = E_{A.SD}(f). \quad (6)$$

В уравнениях 5 и 6 $I_{A.SD}(f)$ и $E_{A.SD}(f)$ – спектральные плотности источника тока и источника шума напряжения ОУ, а единицы спектральных плотностей $A/\sqrt{Гц}$ и $V/\sqrt{Гц}$ соответственно.

Уравнение 7 показывает, что если мы увеличим сопротивление R_B , то тепловой шум, вызванный R_B , будет снижен в высокочастотном диапазоне. Напротив, увеличение сопротивления также увеличивает уровень шума в нижнем диапазоне частот. На рис. 5 показаны расчетные спектральные плотности собственных шумов для нескольких R_B . Можно видеть, что уровень шума уменьшается по мере увеличения сопротивления около 10 Гц.

$$V(f)_{IN.N.VSD} = \sqrt{V(f)_{TH.N.VSD}^2 + V(f)_{CUR.N.VSD}^2 + V(f)_{V.N.VSD}^2} \quad (7)$$

$$V(f)_{INTS.NOISE.VSD} = \sqrt{\frac{4kTR_B + I_{A.SD}(f)^2 R_B^2}{1 + (C_{SHLD} + C_{CLTH})^2 R_B^2 (2\pi f)^2} + E_{A.SD}(f)^2}. \quad (8)$$

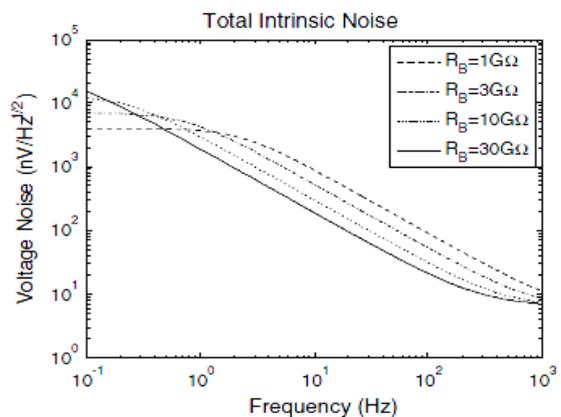


Рис. 5. Расчетные спектральные плотности собственных шумов

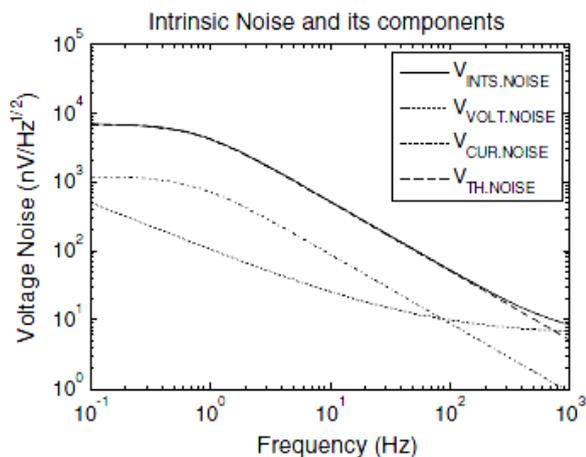


Рис. 6. Общий собственный шум

На рис. 6 показан общий собственный шум, а также его три компонента емкостного электрода. Можно видеть, что компонент теплового шума доминирует над двумя другими компонентами, которые исходят из ОУ. Оценка шума проводилась для коммерческого малозумящего ОУ (OPA124 (TI)), который можно легко получить. Поэтому при тщательном выборе коммерческого операционного усилителя теперь можно игнорировать шум активного устройства.

Артефакты движения

Более крупный артефакт движения возникает при измерениях с использованием сухих электродов или изолированных электродов, даже при непосредственном контакте с голой кожей, по сравнению с измерениями с использованием гелеобразных электродов Ag/AgCl. Кроме того, без прямого контакта с кожей артефакт движения в емкостных измерениях ограничивает применение емкостных электродов.

На рис. 7 показан пример этого артефакта движения при емкостном измерении. ЭКГ измеряли с использованием емкостного метода измерения, когда субъект сидел на стуле [9]. Чтобы исследовать артефакт движения, субъект качнул его верхнюю часть тела назад и вперед или вправо и влево, сидя на стуле. Артефакт движения был настолько большим, что мы не смогли извлечь всю форму ЭКГ. Тем не менее, R-пики можно легко отличить путем фильтрации. Этот результат является примером довольно мягкого артефакта движения. Напротив, многие артефакты движения настолько велики, что они насыщают выход-

ной сигнал усилителя и демонстрируют гармоники большой амплитуды.

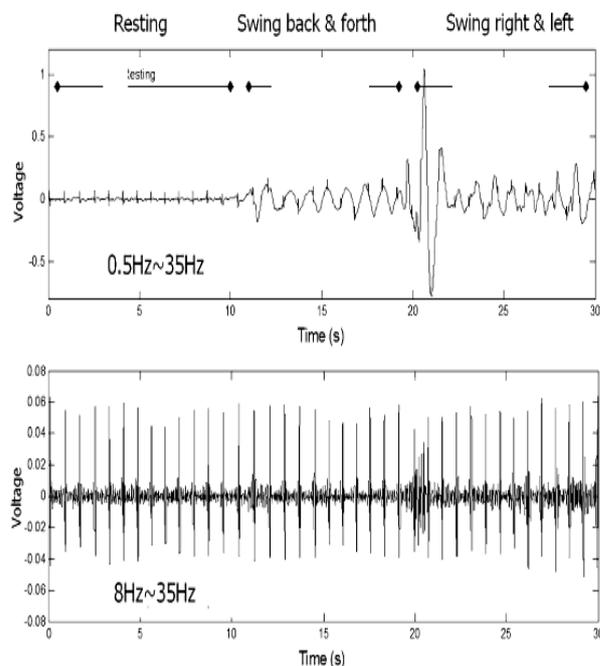


Рис. 7. Артефакт движения при емкостном измерении

Для сухих электродов контактного типа и изолированных электродов увеличение содержания влаги между кожей и электродом уменьшает артефакт движения. Кроме того, для емкостных измерений наблюдалось уменьшение артефакта движения в ходе измерения; предполагалось, что уменьшение было вызвано увеличением влажности. Главной причиной артефакта движения при измерениях емкостных измерений является трибоэлектричество между одеждой и электродом [10].

Были предприняты различные попытки преодолеть артефакт движения, включая поддержание измерительной среды с меньшим трибоэлектричеством и разработку электрода для быстрого возвращения в нормальное состояние после возникновения артефакта движения. В некоторых исследованиях была попытка удалить артефакт движения из сигнала, применяя адаптивный фильтр или усилитель с переменным усилением с дополнительными средствами обнаружения движения. В этих исследованиях рассматривались мелкие артефакты движения, т. е. достаточно малые, чтобы быть приближенными как линейный процесс. В других исследованиях устанавливали сетчатый экран или защиту перед поверхностью электрода. В этих исследованиях сообщ-

шалось, что экранирующая сетка разряжает трибоэлектрический заряд на одежде, уменьшая артефакт движения. Однако в этих сообщениях они не полностью устраняли ухудшение сигнала, которое может быть вызвано уменьшением артефактов движения. Конструкция с экранирующей сеткой имеет меньшее сцепление между корпусом и поверхностью электрода из-за протяженного расстояния между кожей и поверхностью электрода и из-за эффекта экранирования, вызванного сеткой экрана. Как правило, считается, что меньшая связь приводит к снижению качества сигнала при емкостных измерениях [11].

Хотя многие исследования пытались уменьшить артефакты движения или их влияние на ЭКГ, результаты этих исследований по-прежнему демонстрируют частичные достижения, которые применимы к ограниченным областям. Вероятно, что эта ситуация продолжится и в ближайшем будущем.

Заключение

В этой статье была рассмотрена разработка емкостного электрода, предназначенного для регистрации медико-биологических показателей. Модель включает: непосредственно электрод, обеспечивающий бесконтактное считывание биопотенциалов человека через емкостную связь; буферный каскад, необходимый для согласования приемной части устройства с последующими каскадами; высокочастотный фильтр с требуемой частотой среза; делитель напряжения в качестве смесителя постоянного напряжения на необходимое значение; активный фильтр, служащий для конечного усиления и низкочастотной фильтрации электрического сигнала.

В случае использования датчика в качестве регистратора электроэнцефалограммы, то есть биоэлектрических потенциалов мозга че-

ловека, габариты электрода могут быть уменьшены. Вследствие чего эквивалентная емкость на разделе кожа-электрод уменьшится. Это означает, что нужно осуществлять расчет с учетом рассматриваемых условий, так как амплитуда сигнала упадет, а именно делителя напряжения и активного фильтра.

Литература

1. Wearable medical systems for p-health / X.-F. Teng, Y.-T. Zhang, C. Poon, P. Bonato // *IEEE Rev. Biomed. Eng.* 2008. Vol. 1. No. 1. pp. 62–74.
2. Taheri B.A., Knight R.T., Smith R.L. A dry electrode for EEG recording // *Electroencephalography Clin. Neurophysiol.* 1994. Vol. 90. No. 5. pp. 376–383.
3. Searle and L. Kirkup. A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes// *Physiol. Meas.* 2000. Vol. 21. pp. 271–284
4. ECG measurement using capacitive coupling electrodes for man-machine emotional communication / T. Maruyama, M. Makikawa, N. Shiozawa, Y. Fujiwara// *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering.* 2007 (CME 2007). pp. 378–383.
5. A performance comparison of dry-foam type capacitively coupled EEG electrodes depending on the contact area/ J.H. Kim, H.J. Baek, Y.G. Lim, K.S. Park // *46th Conference of Korean Society of Medical & Biological Engineering.* Korea, 2012. pp. 517–518.
6. Chi Y.M., Jung T.-P., Cauwenberghs G. Dry-Contact and Noncontact Biopotential Electrodes: Methodological Review// *IEEE Reviews in Biomedical Engineering.* 2010. 3:106-119.
7. Thin and flexible active electrodes with shield for capacitive electrocardiogram measurement/ S.M. Lee, K.S. Sim, K.K. Kim, Y.G. Lim, K.S. Park // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2010. 48:447–457.
8. Ott H.W. Noise reduction techniques in electronic systems. New York: Wiley, 1988.
9. Lim Y.G., Kim K.K., Park S. ECG measurement on a chair without conductive contact// *Biomed. Eng. IEEE Trans.* 2006. 53:956–959.
10. Triboelectricity in capacitive biopotential measurements / T. Wartzek, T. Lammersen, B. Eilebrecht, M. Walter, S. Leonhardt // *Biomed. Eng. IEEE Trans.* 2011. 58:1268–1277.
11. Peng G., Sterling M., Bocko M. Non-contact, capacitive biosensor electrodes for electrostatic charge reduction // *2013 IEEE Sensors.* 2013. pp. 1–4.

Поступила 06.05.2019; принята к публикации 14.06.2019

Информация об авторах

Журавлев Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ddom@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>

Сафонов Иван Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>

Остроумов Иван Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>

Анисимов Иван Сергеевич - студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

DEVELOPMENT OF CAPACITIVE ELECTRODES FOR THE RECORDING OF BIOMEDICAL INDICATORS

D.V. Zhuravlev, I.A. Safonov, I.V. Ostroumov, I.S. Anisimov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this article we consider the features of the development of a capacitive electrode intended for the registration of biomedical indicators by improving the existing methods of registering biopotentials in order to improve the quality of the received signal and sensor technology that does not require mechanical or resistive contacts for measurements that meet current development trends of electronic medical systems. Capacitive electrodes will allow one to reach a completely new level of comfort and ease of use of biomedical measuring devices in everyday life, and also allow significant savings, due to the very long period of use of such electrodes. The usefulness of contactless electrodes is in high signal quality in terms of the signal-to-noise ratio. Compared to conventional electrodes, developed capacitive electrodes for measuring bioelectric signals are suitable for use in very high impedance conditions (high resistance, low capacitance) between the body surface and the electrode. The model includes: directly electrode providing non-contact reading of human biopotentials through capacitive coupling; buffer cascade required for matching the receiving part of the device with subsequent cascades; high-pass filter with the required cutoff frequency; voltage divider as a constant voltage mixer for the required value; active filter that serves for the final amplification and low-frequency filtering of the electrical signal

Key words: device of registration of medical and biological indicators, ECG, EEG

References

1. Teng X.-F., Zhang Y.-T., Poon C., Bonato P. "Wearable medical systems for p-health", *IEEE Rev. Biomed. Eng.*, 2008, vol. 1, no. 1, pp. 62–74.
2. Taheri B.A., Knight R.T., Smith R.L. "A dry electrode for EEG recording", *Electroencephalography Clin. Neurophysiol.*, 1994, vol. 90, no. 5, pp. 376–383.
3. Searle A., Kirkup L. "A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes", *Physiol. Meas.*, 2000, vol. 21, pp. 271–284
4. Maruyama T., Makikawa M., Shiozawa N., Fujiwara Y. "ECG measurement using capacitive coupling electrodes for man-machine emotional communication", *IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2007, pp. 378–383.
5. Kim J.H., Baek H.J., Lim Y.G., Park K.S. "A performance comparison of dry-foam type capacitively coupled EEG electrodes depending on the contact area", *46th Conference of Korean Society of Medical & Biological Engineering*, Korea, 2012, pp. 517–518.
6. Chi Y.M., Jung T.-P., Cauwenberghs G. "Dry-contact noncontact biopotential electrodes: methodological review", *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2010, vol. 3, pp. 106–119
7. Lee S.M., Sim K.S., Kim K.K., Lim Y.G., Park K.S. "Thin and flexible active electrodes with shield for capacitive electrocardiogram measurement", *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2010, vol. 48, pp. 447–457
8. Ott H.W. "Noise reduction techniques in electronic systems", New York, Wiley, 1988.
9. Lim Y.G., Kim K.K., Park S. "ECG measurement on a chair without conductive contact", *Biomed. Eng. IEEE Trans.*, 2006, vol. 53, pp. 956–959
10. Wartzek T., Lammersen T., Eilebrecht B., Walter M., Leonhardt S. "Triboelectricity in capacitive biopotential measurements", *Biomed. Eng. IEEE Trans.*, 2011, vol. 58, pp. 1268–1277
11. Peng G., Sterling M., Bocko M. "Non-contact, capacitive biosensor electrodes for electrostatic charge reduction", *2013 IEEE Sensors*, 2013, pp. 1–4.

Submitted 06.05.2019; revised 14.06.2019

Information about the authors

Dmitriy V. Zhuravlev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ddom@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1087-9704>
Ivan A. Safonov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: saff@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3825-4770>
Ivan V. Ostroumov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: vanik07@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2796-2886>
Ivan S. Anisimov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pilot7mig@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0681-1299>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.3.017

УДК 621.791

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА ПОРИСТЫМИ
ТИТАНОВЫМИ СРЕДАМИ****И.Б. Корчагин, В.В. Пешков, П.П. Чехлыстов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: некоторые прецизионные технологические процессы, связанные с высокотемпературной обработкой активных материалов, требуют наличия инертной защитной среды высокой степени чистоты. Используемый в таких процессах аргон высшего сорта имеет примеси кислорода, азота, влаги, которые образуют соединения, отрицательно влияющие на качество изготавливаемого изделия, таким образом получение инертных сред высокой степени чистоты является актуальной задачей. Высокую степень чистоты инертного газа можно получить с использованием титановых фильтров, обладающих высокими адсорбционными и абсорбционными свойствами по отношению к активным примесям, особенно кислороду. Их эффективное использование требует построения модели процесса фильтрации – поведения примеси в поровом канале фильтра при пропускании через него инертного газа. В работе выполнено физико-математическое моделирование процесса очистки аргона от кислорода в поровом канале титанового фильтра, определено влияние таких параметров, как размер порового канала, скорость течения аргона, температура фильтрации на степень чистоты аргона, пропускаемого через титановый фильтр. Анализ полученных результатов показал, что чем длиннее канал и меньше его радиус, тем выше степень чистоты фильтруемого инертного газа. Степень очистки уменьшается с увеличением скорости течения инертного газа в поровом пространстве; степень очистки аргона от кислорода увеличивается с ростом температуры

Ключевые слова: абсорбция, титановый фильтр, активная примесь, инертный газ, моделирование процесса фильтрации, поровый канал, диффузионный поток, коэффициент диффузии, температура фильтрации

Введение

Одним из эффективных путей решения задачи химической очистки различных сред, в том числе газовых, является применение металлических титановых фильтров. В целом ряде прецизионных технологических процессов, связанных с высокотемпературной обработкой металлов, используют инертные защитные среды (газы – аргон, гелий). Самый чистый аргон, аргон высшего сорта (ГОСТ 10157-79), содержит достаточно большое количество примесей (кислорода 0,0007%; азота 0,006%; влаги до 0,007 г/м³). При нагреве в среде аргона высшего сорта таких материалов, как титан, цирконий, молибден, магний, алюминий, происходит их достаточно интенсивное окисление, что отрицательным образом сказывается на реализации технологии и качестве конечного изделия. Снижение активных примесей в инертных газах с применением таких фильтрующих материалов, как силикогель и алюмогель, позволяет лишь адсорбировать молекулы влаги, более перспективным представляется использование фильтров на металлической основе с высокой абсорбционной способностью и низкой упруго-

стью диссоциации образующихся химических соединений.

Использование фильтров, выполненных из титанового порошка, позволяет производить тонкую очистку используемых в технике инертных газов. Титан, обладая высокими геттерными свойствами к кислороду, способен растворять в себе до 30% (ат.) данного газа [1]. При этом оксиды, образующиеся в результате взаимодействия титана с кислородом, имеют очень низкие значения упругости диссоциации, например упругость диссоциации оксида TiO₂ при температуре 1000⁰ К составляет 1,2·10⁻²⁵ Па [2]. При этом факторами, влияющими на степень чистоты инертного газа, являются температура фильтрующего материала, скорость прохождения газа через фильтрующий материал, время очистки, геометрические характеристики фильтра. Однако обоснованных данных о влиянии этих факторов на развитие и эффективность процесса очистки инертных газов от активных примесей в настоящее время нет.

Моделирование процессов очистки, позволяющее определить параметры, влияющие на степень чистоты газа, является на сегодняшний день актуальной задачей. Решение этой задачи связано с анализом процессов, протекающих в системе твердое тело – газ.

Постановка задачи

Изменение концентрации активной составляющей газовой фазы на стадии очистки сложно определить с помощью прямого эксперимента. Сложность проведения такого эксперимента связана с основными геометрическими параметрами порового канала фильтра. Размер поры характеризуется малым диаметром (микрон), его длина – большой извилистостью и сложной топологией поверхности. В связи с этим размещение чувствительного элемента измерительного прибора в поровом канале фильтра практически невозможно. В противном случае это могло бы необратимым образом отразиться на протекающих процессах, так как размер чувствительного элемента соответствовал бы размеру порового канала. Результаты такого эксперимента не могли быть достоверными.

Задача по определению изменения плотности концентрации активной составляющей газовой фазы может быть решена на основе моделирования процессов массопереноса, протекающих в элементарном прямолинейном поровом канале круглого сечения при высокотемпературном нагреве.

В среде аргона титан в первую очередь взаимодействует с примесью кислорода. Поэтому целесообразно проанализировать распределение кислорода в поровом канале фильтра.

При нагреве в поровом канале фильтра, выполненного из титана, протекают следующие процессы. В начальный момент времени концентрация активной составляющей – кислорода в поровом канале – соответствует его концентрации в газовой фазе – среде аргона. Титан, окисляясь при нагреве, поглощает кислород из объема порового канала. По мере движения газовой фазы по длине канала концентрация кислорода в среде аргона будет снижаться. Интенсивность взаимодействия металла с кислородом возрастает с повышением температуры.

Задача состоит в получении выражения, позволяющего производить количественную оценку распределения концентрации кислорода в поровом канале фильтра; степени очистки аргона от кислорода в зависимости от таких технологических параметров процесса фильтрации, как температура, размеры порового канала фильтра, скорость течения газовой фазы.

Метод исследования

Рассмотрим диффузионную задачу для порового канала фильтра длиной l , с внутренним радиусом a , и внешним радиусом b (рис. 1).

В цилиндрической системе координат (x, r, φ) параметры всех протекающих процессов ввиду симметричности граничных условий не зависят от φ .

Так как внутренний радиус порового канала a порядка $10^{-4} - 10^{-5}$ м, то все физические характеристики протекающей по каналу газовой фазы рассматриваются как средние по сечению канала. Температуры газовой фазы и стенок канала одинаковы и не зависят от x, r, φ, t . Считаем среднюю по сечению скорость смеси \bar{v} постоянной величиной. Коэффициент диффузии примеси кислорода в газовой фазе D вдоль канала является функцией температуры $D = f(T)$.

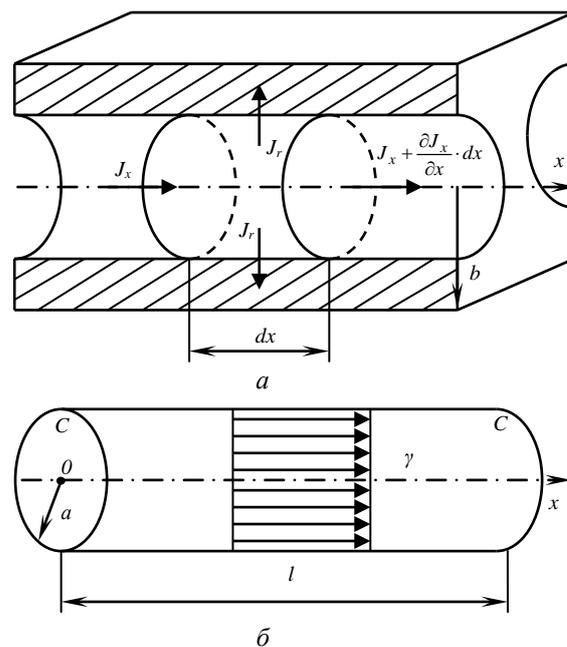


Рис. 1. Схема порового канала фильтра

Выделим в единичном поровом канале фильтра элементарный объем $dV = \pi a^2 \cdot dx$. Обозначим через C_1 – отношение плотности примеси ρ_1 к плотности газовой фазы ρ_c :

$$C_1 = \frac{\rho_1}{\rho_c} \tag{1}$$

Диффузионный поток массы активной составляющей J_x в направлении оси канала X :

$$J_x = -D \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \cdot \pi a^2 + \gamma \cdot \pi a^2 \cdot \rho_1. \quad (2)$$

Поток активной составляющей в стенку порового канала:

$$J_r = -2\pi a \cdot \left(\frac{\beta_0}{2} \right) \cdot \rho_1 \cdot dx. \quad (3)$$

В этих обозначениях коэффициенты D и β_0 - функции температуры и не зависят от x, r, φ, t .

В элементарном объеме порового канала фильтра $dV = \pi a^2 \cdot dx$ баланс потоков активной составляющей запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} \cdot \pi a^2 \cdot dx = D \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} \cdot \pi a^2 \cdot dx - \\ - \gamma \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \cdot \pi a^2 \cdot dx - \beta_0 \cdot \rho_1 \cdot 2\pi a \cdot dx \end{aligned} \quad (4)$$

Разделив (4) на $\pi a^2 \cdot dx$, получим:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \gamma \frac{\partial \rho_1}{\partial x} = D \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} - \frac{\beta_0}{a} \cdot \rho_1. \quad (5)$$

Первое слагаемое в левой части уравнения есть скорость изменения плотности активной составляющей за счет конвективного потока $\gamma \frac{\partial \rho_1}{\partial x}$, за счет диффузии $D \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2}$ и за счет сорбции активной составляющей материалом стенки порового канала фильтра.

Процесс сорбции ввиду малого радиуса порового канала фильтра описывается как обычно стоком $(-\frac{\beta_0}{a} \cdot \rho_1)$.

Если C_1 заключено в пределах:

$$10^{-5} \leq C_1 \leq 10^{-3}, \quad (6)$$

то плотность газовой фазы можно считать постоянной:

$$\rho_c = const. \quad (7)$$

Отметим, что если разделить (4) на $\rho_c = const$ и поделить на $\pi a^2 \cdot dx$, то получим уравнение для C_1 :

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + \gamma \frac{\partial C_1}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - \frac{\beta_0}{a} \cdot C_1. \quad (8)$$

Определим поток J_x . Поток кислорода в поровом канале фильтра обусловлен градиентом его концентрации, поэтому его плотность:

$$J_x = -D \left(\frac{\partial C_1}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где D - коэффициент диффузии кислорода в газовой фазе.

Частица газа, движущаяся со скоростью V_{ap} , пробегает свободно путь λ_0 до удара с другой частицей. Величина, пропорциональная произведению пути λ_0 на скорость V_{ap} , определяется как коэффициент диффузии.

Рассмотрение механизма движения частиц газа приводит к формуле коэффициента диффузии в виде [3]:

$$D = \frac{1}{3} V_{ap} \cdot \lambda_0. \quad (10)$$

Более строгий анализ показывает, что формула (10) требует введения поправочного множителя ζ_D , который учитывает максвелловское распределение скоростей молекул газа:

$$D = \frac{1}{3} \zeta_D \cdot V_{ap} \cdot \lambda_0, \quad (11)$$

где $\zeta_D = 1,5 \dots 2,2$.

Механизм диффузии зависит от условий в которых находится газ. Так как активная примесь является составляющей инертного газа, то для данного случая характерен механизм движения частиц кислорода в вязкостных условиях. Подставляя в уравнение (11) вместо λ_0 и V_{ap} соответствующие величины, принимая значение коэффициента $\zeta_D = 2,1$ получим:

$$D \cong 2,2 \cdot 10^{-16} \frac{1}{d_0^2 \cdot \sqrt{M_0}} \cdot \frac{T^{3/2}}{P}, \quad (12)$$

где d_0 - диаметр молекулы кислорода, M_0 - молекулярная масса кислорода, T - температура в поровом канале, P - давление кислорода.

Переход от давления кислорода P к его концентрации C_1 , можно осуществить по формуле:

$$P = C_1 \cdot k \cdot T, \quad (13)$$

где k - постоянная Больцмана.

Формула (12) примет вид:

$$D \cong 2,2 \cdot 10^{-16} \frac{1}{d_0^2 \cdot C_1 \cdot k} \cdot \sqrt{\frac{T}{M_0}} \cdot (14)$$

Основным процессом, определяющим понижение давления кислорода в поровом канале фильтра, является абсорбция. При взаимодействии кислорода с титаном в поверхностном слое металла с течением времени наступает пересыщение, сопровождаемое перестройкой кристаллической решетки с образованием химического соединения с газом [4]. Количество кислорода, поглощаемое титаном путем химической реакции, зависит от давления газа и температуры. Упругость диссоциации оксидов титана имеет очень низкое значение, поэтому поглощение кислорода титаном будет иметь место при всех практически создаваемых разрежениях [2].

В процессе абсорбции, сопровождаемой химической реакцией кислорода с титаном, продукты реакции получают в виде слоя оксида и твердого раствора внедрения в металле.

Поток газа, образующий твердый раствор внедрения, может быть оценен по уравнению:

$$J_r = (C_0 - C_m) \cdot \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t}}, \quad (15)$$

где C_0 , C_m - концентрация газа в начальный момент времени на пограничной плоскости металл-газ и в металле, соответственно, D_m - коэффициент диффузии газа в металле.

Величина C_0 может равняться предельной растворимости кислорода в титане – 30...32% (ат.). Однако очевидно, что предельная концентрация устанавливается не мгновенно. Известно, что окисление на воздухе при 923 К приводит к образованию твердого раствора в поверхностном слое с концентрацией кислорода, равной 14...15% (ат.), при 973 К – 13...17% (ат.) При этом концентрация кислорода оставалась постоянной в течение длительного времени (1-2 суток), а затем увеличивалась. Отметим, что определение J_r по этой зависимости не учитывает той части кислорода, которая пошла на образование оксида, а также не учитывается зависимость C_0 от концентрации газа над поверхностью металла.

Поэтому поток газа в металл при нагреве J_r целесообразно выразить, используя уравнения, описывающие кинетику окисления. Кинетические кривые окисления для многих метал-

лов, в том числе и титана, полученные гравиметрическим методом, могут быть описаны зависимостью вида:

$$\Delta m^{a^*} = k_0 \cdot t^*, \quad (16)$$

где Δm - увеличение массы образца по мере развития реакции окисления, k_0 - константа окисления, t^* время окисления, a^* - показатель степени, изменяющийся в зависимости от механизма окисления в интервале 1...3.

При постоянном давлении кислорода k_0 является экспоненциальной функцией температуры:

$$k_0 \approx \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (17)$$

где E - энергия активации процесса окисления.

Зависимость k_0 от давления кислорода может быть описана выражением вида:

$$k_0 \approx P_{O_2}^{b^*}, \quad (18)$$

где b^* - показатель степени, определяющий порядок реакции и изменяющийся в зависимости от режима окисления от 0 до 1.

Выразим Δm через количество молекул кислорода n_{O_2} , провзаимодействовавших с титаном в процессе окисления:

$$\Delta m = \frac{M}{N_A} \cdot n_{O_2}, \quad (19)$$

где N_A - число Авогадро.

Тогда, выразив P_{O_2} через C_1 , уравнение (16) с учетом (17 - 19) можно выразить в следующем виде:

$$n_{O_2} = A \cdot C_1^{\frac{b^*}{a^*}} \cdot t^{\frac{1}{a^*}},$$

$$A = \frac{N_A}{M} \cdot \left[\chi \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \right]^{\frac{1}{a^*}} \cdot (k \cdot T)^{\frac{b^*}{a^*}} \cdot (20)$$

Процесс окисления существенно зависит от состава газовой фазы. С целью упрощения дальнейших расчетов примем $b^* = 1$. Параболические кривые окисления (рис. 2) в области времени до 1 часа с достаточной степенью точности можно линеаризовать и показатель степени a^* принять равным единице.

Тогда поток J_r кислорода в металл, в процессе абсорбции, сопровождаемой химической реакцией кислорода с титаном, будет равен:

$$J_r = \frac{dn_{O_2}}{dt} = A \cdot C_1. \quad (21)$$

Подставляя в (8) найденные выражения для потоков J_x и J_r , учитывая скорость течения газовой фазы в поре $\bar{\gamma}$, получим дифференциальное уравнение, описывающее динамику процесса очистки аргона от активной примеси – кислорода в поровом канале фильтра, изготовленного из титанового порошка:

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} + \bar{\gamma} \frac{\partial C_1}{\partial x} = D(t) \cdot \frac{\partial^2 C_1}{\partial x^2} - \frac{2}{a} \cdot A \cdot C_1. \quad (22)$$

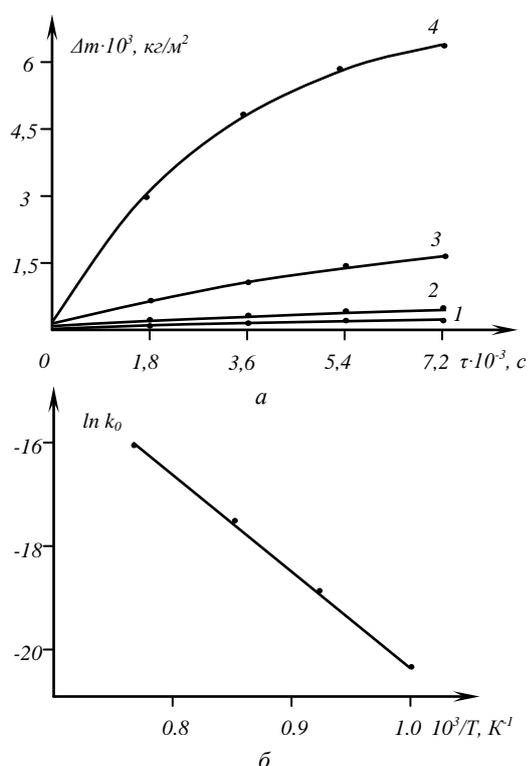


Рис. 2. Кинетика окисления титана при T , К:
1 – 973; 2 – 1073; 3 – 1173; 4 – 1273
в аргоне при нормальном атмосферном давлении (а);
зависимость $\ln k_0 = f(1/T)$ (б)

Поступила 11.03.2019; принята к публикации 11.06.2019

Информация об авторах

Корчагин Илья Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79507568283, e-mail: ibkor4agin@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2399-2319>

Пешков Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +79155479137, e-mail: otpsp@vorstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Чехлыстов Павел Петрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +9507665968, e-mail: chpavel207@gmail.com

Анализ результатов

Анализ решения данного уравнения при различных вариантах технологических параметров процесса фильтрации (температуры, скорости газовой смеси, размера канала) показал, что:

- концентрация кислорода в поровом канале фильтра прямо пропорциональна автомо-

дельной переменной $\eta = \frac{l}{a}$, то есть чем длин-

нее канал, или чем меньше его радиус, тем ниже концентрация кислорода в аргоне – выше степень очистки аргона;

- степень очистки уменьшается с увеличением скорости течения инертного газа - $\bar{\gamma}$;

- степень очистки аргона от кислорода увеличивается с ростом температуры, причем установлено что рост температуры с 973 К до 1273 К приводит к увеличению стока кислорода в стенку канала более чем в 100 раз.

Литература

1. Окисление титана и его сплавов / А.С. Бай и др. М.: Металлургия, 1970. 320 с.
2. Шейндлин А.Е. Теплофизические свойства титана и его сплавов: справочник / под. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Металлургия, 1985. 102 с.
3. Основы вакуумной техники: учебник для техникумов / А.И. Пипко и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 432 с.
4. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. М.: Машгиз, 1962. 856 с.

MODELING OF GAS FILTRATION PROCESS BY POROUS TITANIUM MEDIA

I.B. Korchagin, V.V. Peshkov, P.P. Chekhlystov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: some precision technological processes associated with high-temperature treatment of active materials require an inert protective medium of high purity. Argon of the highest grade used in such processes has impurities that form compounds that adversely affect the quality of the manufactured product. Thus, obtaining inert media of high purity is an urgent task. A high degree of purity of an inert gas can be obtained using titanium filters. Their effective use requires the construction of a model of the filtration process - the behavior of impurities in the pore channel of the filter, when an inert gas passes through it. We performed a physical and mathematical modeling of the process of argon purification from oxygen in the pore channel of a titanium filter and determined the influence of parameters such as the size of the pore channel, the flow rate of argon, and the filtration temperature on the degree of argon purity passed through the titanium filter. Analysis of the obtained results showed that the longer the channel and the smaller its radius, the higher the purity of the inert gas being filtered. The degree of purification decreases with an increase in the rate of flow of inert gas in the pore space; the degree of purification of argon from oxygen increases with increasing temperature

Key words: absorption, titanium filter, activated admixture, inert gas, filtration process modeling, pore channel, diffusion flux, diffusion coefficient, filtration temperature

References

1. Bai A.S. et al. "Oxidation of titanium and its alloys" ("Okislenie titana i ego splavov"), Moscow: Metallurgiya, 1970, 320 p.
2. Sheindlin A.E. "Thermophysical properties of titanium and its alloys: reference book" ("Teplofizicheskie svoystva titana i ego splavov: spravochnik"), ed. A.E. Sheindlin, Moscow, Metallurgiya, 1985, 102 p.
3. Pipko A.I. et al. "Basics of vacuum technology: textbook for technical schools" ("Osnovy vakuumnoy tekhniki: uchebnik dlya tekhnikumov"), Moscow, Energoizdat, 1981, 432 p.
4. Evans U.R. "Corrosion and oxidation of metals" ("Korroziya i okislenie metallov"), Moscow, Mashgiz, 1962, 856 p.

Submitted 11.03.2019; revised 11.06.2019

Information about the authors

И'ya B. Korchagin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. + 79507568283, e-mail: ibkor4agin@yandex.ru,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2399-2319>

Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +79155479137, e-mail: otsp@vorstu.ru,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Pavel P. Chekhlystov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +9507665968, e-mail: chpavel207@gmail.com

МЕХАНИЗМ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ В КАВИТАЦИОННОМ РЕЖИМЕ**О.В. Скрыгин, В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: рассмотрен механизм интенсификации массовыноса из межэлектродного пространства продуктов выполнения процесса при комбинированной обработке деталей с наложением электрического поля. Показано, что известные способы удаления припуска этим методом имеют существенные ограничения по повышению производительности изготовления деталей из-за снижения скорости выноса продуктов обработки из зоны удаления припуска. Раскрыт новый подход к интенсификации массовыноса путем импульсного воздействия на рабочую среду с целью формирования кавитационного течения жидкости. Показано, что такой подход к решению проблемы массовыноса способен значительно ускорить удаление из зазора продуктов обработки и поддерживать стабильность начальной скорости снятия припуска по мере углубления в заготовку электрода-инструмента. Приведены условия управления кавитационным режимом течения рабочей среды, расширяющие возможности эффективного использования в машиностроении комбинированных методов обработки. Обоснована область рационального использования в машиностроении электрических методов обработки с применением кавитационного течения рабочей среды. Показано, что новые методы технически и экономически выгодны для получения глубоких сквозных и глухих отверстий в металлических заготовках. Разработанные технологии обеспечивают также интенсификацию процесса разделения заготовок проволочным электродом-инструментом с использованием уже имеющегося на предприятии серийного оборудования, оснащенного форсунками для подачи в паз жидкой рабочей среды. Кроме того метод перспективен для формообразования сложно-контурных элементов деталей с повышенной длиной межэлектродного промежутка, где для достижения высоких технологических показателей требуется обеспечить стабильные условия массовыноса продуктов обработки

Ключевые слова: комбинированная обработка, кавитационное течение, механизм, импульсные воздействия, массовынос, технология

Введение

В работах [1, 2, 3] установлено, что при комбинированных методах обработки средняя скорость удаления припуска зависит от интенсивности массовыноса продуктов процесса из межэлектродного промежутка. Рекомендованные в [1, 4, 5, 6] методы ускорения массовыноса за счет ускорения и изменения характера течения жидкости через межэлектродный зазор исчерпали свои возможности и требуются новые [7, 8, 9, 10] способы решения этой проблемы. Предложенная в статье методика [10] дала возможность прогнозировать эффективность и обоснованность новых методов с учетом условий эксплуатации изделий.

Этапы массовыноса продуктов обработки при кавитационном течении рабочей среды

Применение устройств для комбинированной обработки при кавитационном течении рабочей среды технически и экономически оправдано при изготовлении глубоких сквозных и глухих отверстий и каналов малого сече-

ния, разделении заготовок большой толщины, обработке крупногабаритных деталей с удлиненной трассой течения рабочей среды в межэлектродном промежутке. В этих случаях становится оправданным усложнение и удорожание средств технологического оснащения оборудования для создания и управления кавитационным массовыносом продуктов обработки. Наиболее значимые результаты достигнуты при прошивке глубоких отверстий с использованием схемы [1; 4] с периодическим выводом профильного электрода - инструмента из сформированной части отверстия. Импульсное воздействие созданного кавитационного течения осуществляется после вывода из канала электрода-инструмента, что позволяет усилить насосный эффект и ускорить массовынос продуктов обработки. За счет этого режим обработки становится более стабильным и приближается к начальному наиболее производительному периоду формообразования каналов. Кавитационное течение может создаваться за счет высокой скорости течения жидкости и зависит от вязкости среды, контура зазора по направлению перемещения в нем рабочей среды. Как показано в [11], кавитация активно развивается при импульсных движениях жидкости на свободном от препятствий участках трассы при

наличии микрочастиц твердых материалов и газов. В процессе комбинированной обработки за счет тепловых и химических воздействий в зазоре формируется большое количество таких микрочастиц. Необходимая скорость жидкости может быть получена импульсами от разрядов в жидкости на участке до начала прошиваемого канала. Это может быть осуществлено с помощью форсунки для подачи в зазор рабочей среды, что уже используется при разделении заготовок большой толщины непрофилированным проволочным электродом. Для создания импульса течения жидкости на срезе такой форсунки требуется установить разрядник, срабатывающий при схеме прошивки в момент окончания вывода профильного электрода-инструмента из отверстия, или систематически повторять разряд, вызывая импульс давления на рабочую среду со стороны входа или выхода из паза электрода-проволоки. Для устранения обратного течения жидкости в канале форсунки профиль ее сопла выполняют в виде сопла Лавалья, в котором в начале выходного участка образуется повышенное давление в струе, препятствующее возврату в канал жидкости. Появление кавитационного течения наиболее достижимо для рабочих сред на базе воды, обладающей малой вязкостью среди других применяемых сред.

Для рассматриваемого случая массовыноса продуктов обработки при прошивке глубоких отверстий и каналов физическая модель процесса содержит несколько этапов:

1. Образование ударной волны от разряда в жидкости (рис. 1).

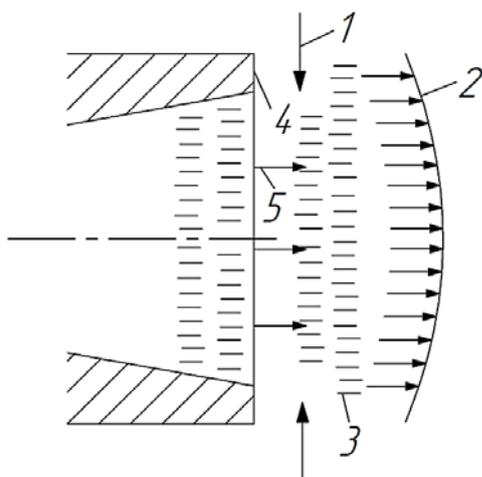


Рис. 1. Формирование ударной волны:
1 – разрядник; 2 – фронт ударной волны;
3 – жидкая рабочая среда; 4 – срез форсунки;
5 – отраженная ударная волна

В момент разряда в жидкой рабочей среде 3 (рис. 1) создается ударная волна 2, которая идет от разрядника 1 в сторону межэлектродного зазора. Одновременно импульс силы разряда вызывает обратное течение в сторону среза форсунки 4. Если профиль сопла форсунки имеет форму сопла Лавалья, то повышенное давление в нем отражает волну и усиливает скорость фронта 2.

2. Локализация зоны действия ударной волны

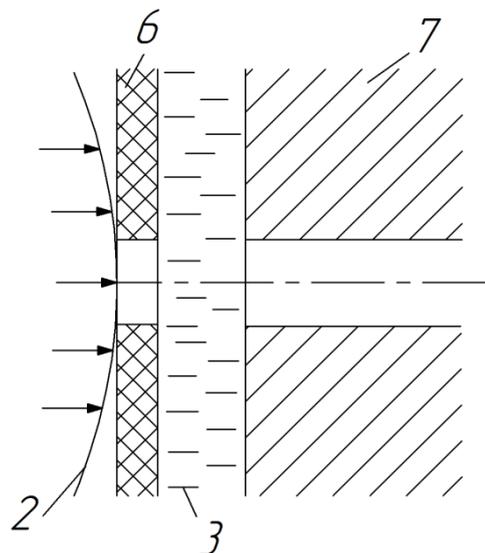


Рис. 2. Формирование границ действия ударной волны:
6 – ограничитель; 7 – заготовка (остальные индексы приведены на рис. 1)

Ударная волна 2 (рис. 2) воздействует на ограничитель 6 из вязкого материала, не чувствительного к кавитационному разрушению. В нем сделано отверстие с размерами отверстия в детали 7. Ударная волна тормозится о стенки отверстия в ограничителе 6, образуются различия скоростей течения струй по их сечению в отверстии, завихрения в зоне между ограничителем и заготовкой. Ограничитель защищает от разрушения кавитацией кромки отверстия в заготовке, особенно если она из хрупкого материала, например твердого сплава. В качестве ограничителя может использоваться сменный элемент из лавсановой пленки, лаковые и красочные покрытия на срезе сопла 4 (рис. 1).

3. Формирование зоны кавитации в пространстве между ограничителем и заготовкой.

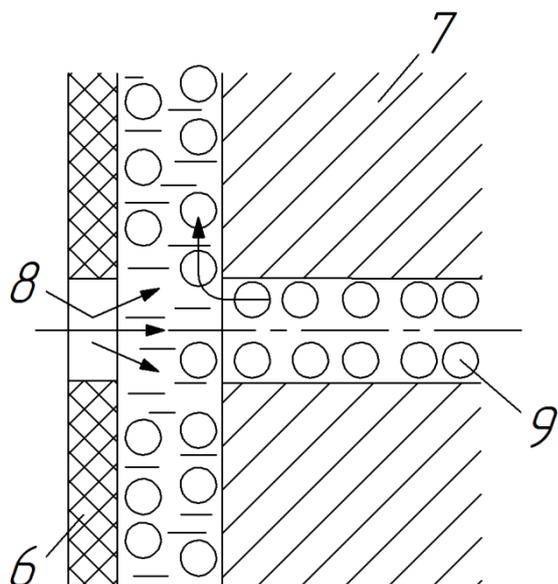


Рис. 3. Образование зоны кавитации
8 – векторы импульсных кавитационных перемещений рабочей среды; 9 – микрочастицы твердых и газообразных продуктов обработки

Наличие в пространстве между ограничителем 6 и заготовкой 7 продуктов обработки 9 (рис. 3), удаляемых из прошитой части канала в заготовке 7, и закрутка струи, образование вихрей, приведенных в [12], при прокачке жидкости через отверстие в ограничителе 6 (рис. 2) способствуют появлению кавитационного перемещения жидкости в сформированную часть отверстия в заготовке, что создает импульс за счет повышения в нем давления и сжатия газообразных продуктов обработки.

4. Создание насосного эффекта

Время импульса разряда невелико, поэтому после сжатия газов в прошитой части канала или отверстия возникает резкое расширение среды в прошитой части и продукты обработки, содержащие твердые и газообразные частицы 9, удаляются по направлению 10 в пространство между ограничителем 6 и заготовкой 7, откуда выносятся потоком рабочей среды 3.

Применение насосного эффекта (рис. 4) аналогично методам, приведенным в [13] для обработки длиномерных поверхностей, где ускорение массовыноса обеспечивают временным прекращением съема припуска, в течение которого напором потока в межэлектродном зазоре удаляют из него продукты обработки.

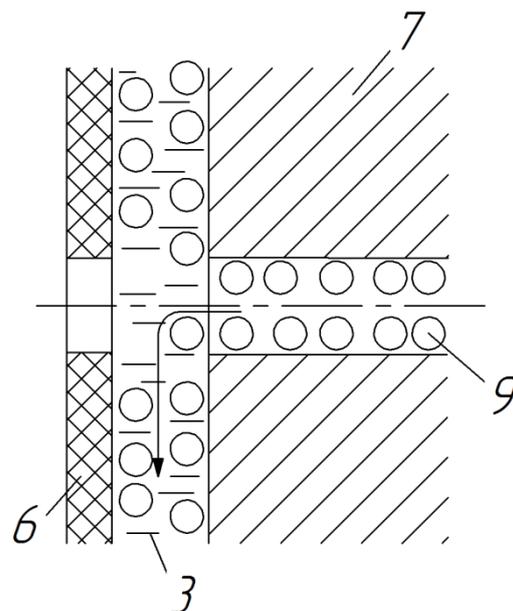


Рис. 4. Схема образования насосного эффекта (стрелкой показан вектор действия насосного эффекта)

Приведенные этапы показывают целесообразность использования схемы, приведенной на рис. 1, для увеличения скорости разделения толстых заготовок непрофилированным электродом-инструментом и для групповой прошивки глубоких отверстий малого сечения, например в цельных металлических фильтрах тонкой очистки.

Моделирование механизма кавитационного режима течения рабочей среды

Рассмотренные этапы массовыноса позволяют разработать модель массовыноса при комбинированной обработке в жидкой рабочей среде. Здесь в качестве начальных условий построения модели принято [11, Т. 1], что к началу кавитационного процесса уже имеются необходимые для этого условия, в частности присутствуют микрочастицы твердых продуктов обработки и газа, образующиеся в процессе вскипания при электрических разрядах или как результат химических реакций.

Граничным условием существования кавитационного течения может служить критерий массовыноса, предложенный в [11, Т. 1]. Применительно к комбинированным методам обработки перемещение жидкости в межэлектродном зазоре возможно только до полного запирания течения газообразными продуктами обработки, наличие которых было убедительно подтверждено скоростными съемками, при-

веденными в [12, 13]. При этом рост газовых пузырей ограничивается границами межэлектродного зазора, после чего массовынос затухает. Тогда критерий массовыноса может быть представлен в виде (1)

$$\tau_1 \geq \tau_2, \quad (1)$$

где τ_1 – время роста в межэлектродном зазоре газового пузыря от его образования и увеличения диаметра за счет слияния с другими или пополнения объема до достижения диаметра, равного межэлектродному ру; τ_2 – время протекания жидкости с газовыми пузырями через зазор от зоны обработки, где возникают пузырьки, до выхода из зазора

В литературе [14] интенсивность массовыноса предлагается оценивать процентным содержанием твердых продуктов обработки относительно жидкой фазы (для электрохимической обработки такое соотношение ограничено 1-1,2 %). Это не противоречит предложенному нами критерию (1), т.к. после выхода рабочей среды из зазора газовая фаза самоустраняется и оценка возможности появления кавитационного режима проводится по количеству твердой фазы. Соотношение этих фаз в зазоре при одинаковых режимах обработки остается практически неизменным.

Применительно к кавитационному режиму течения жидкости в зазоре по критерию (1) предельная длина пути (L), где имеет место массовынос, составляет

$$L = V_{cp} \tau_2 n, \quad (2)$$

где V_{cp} – средняя скорость течения жидкости с пузырьками газа после действия импульса от кавитационного течения.

В рассматриваемом случае кавитационный режим поддерживается п импульсами разряда в жидкости.

$$n = \frac{L}{V_{cp}(T_1 + T_2)}, \quad (3)$$

где T_1 – время действия импульса на жидкость при разряде; T_2 – длительность паузы между импульсами разрядов (зависит от времени накопления заряда).

Массовынос при кавитационном течении зависит от давления импульса на гранулу в зазоре, которая может включать твердую, газо- и желеобразную фазу из продуктов обработки. Если допустить, что в момент разряда импульс действует на все автономные гранулы, а их столкновение в начале движения маловероятно, то сила поверхностного фронтального давления (P_n , Па) на гранулу по [11, Т. 2] составит

$$P_{\Pi} = P_{\Phi} + P_d, \quad (4)$$

где P_{Φ} – сила гидростатического давления на гранулу от импульса на фронте ударной волны; P_d – динамическая составляющая.

По (4) и [11,Т.2]

$$P_{\Pi} = P_{\Phi} + 0,5\rho_{\Phi}(V_{\Phi} - V_{\Pi})^2, \quad (5)$$

где ρ_{Φ} – плотность рабочей среды на фронте ударной волны (рис. 1). V_{Φ} – скорость фронта ударной волны.

По результатам скоростной съемки и [11, Т. 2] скорость фронта ударной волны в воде около $1500 \frac{м}{сек}$.

V_{Π} – скорость движения гранул в конце действия импульса разряда (по [11, Т. 2] скорость более $100 \frac{м}{сек}$). В том же источнике указывается, что при разряде удельное давление в импульсе превышает 10^4 МПа.

В момент подхода к грануле ударной волны ее скорость можно принять $V_{\Pi}=0$. Тогда

$$P_{\Pi} = P_{\Phi} + 0,5\rho_{\Phi}(V_{\Phi} - V_{\Pi})^2. \quad (6)$$

По [11, Т. 2] P_{Φ} , Па (P_a – атмосферное давление)

$$P_{\Phi} = P_a + 3 \cdot 10^9 \left(\frac{\rho_{\Phi}}{\rho_{ж}} - 1 \right), \quad (7)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность рабочей среды на входе в межэлектродный зазор (для водных растворов при 293 К $\rho_{ж}= 1,03$ г/см³)

Из (7) по [11, Т. 2]

$$P_{\Phi} = \rho_{ж} V_{\text{уб}}^2 - 3 \cdot 10^9. \quad (8)$$

Скорость ударной волны ($V_{\text{уб}}$, м/сек) по [11, Т. 2]

$$V_{\text{уб}} = \frac{V_{\Phi} \rho_{\Phi}}{\rho_{\Phi} - \rho_{ж}} \quad (9)$$

Из теории ударных волн

$$V_{\text{уб}} = 0,7^4 \sqrt{\frac{K_p}{\rho_{ж}}}, \quad (10)$$

где K_p – постоянная разряда, зависит от режима течения и параметров рабочей среды

Откуда

$$K_p = \frac{1}{4} \rho_{ж} \left(\frac{V_{\Phi} \rho_{\Phi}}{\rho_{\Phi} - \rho_{ж}} \right)^4 \quad (11)$$

По [11, Т. 2] минимальное значение постоянной величины, при котором может происходить разряд, оценивается через скорость звука в рабочей среде. Для воды это 1500 м/сек.

Критерием формирования ударной волны в жидкой рабочей среде по [11, Т. 2] является

$$0,5(K_{pmin}/\rho_{ж}) \geq V_{3в}^4 \quad (12)$$

Откуда

$$K_{pmin} \geq 2V_{3в}^4 \rho_{ж} \quad (13)$$

с учетом (13) из (8)

$$P_{\phi} = \rho_{ж} \cdot 0,5 \sqrt{\frac{K_{rp}}{\rho_{ж}}} - 3 \cdot 10^9. \quad (14)$$

Для оценочных расчетов сил воздействия ударной волны на гранулу можно использовать приведенные выше результаты скоростной съемки по [12] и рекомендации по [11, Т. 2], где указано, что радиус активного действия на гранулу фронта ударной волны составляет около $r_{ув} = 1$ мм, время ее существования (τ_{ϕ}) – около 0,3 мкс

Если принять форму гранулы перед началом ее движения в зазоре шаровидной, то можно через ее объем установить площадь экранирования для оценки силы гидростатического давления на гранулу от импульса на фронте ударной волны.

Объем каждой гранулы при электроэрозионной обработке зависит от энергии импульса с учетом коэффициента полезного ее использования. Для чистовой обработки по [11, Т. 1] поперечное сечение частиц составляет 1-5 мкм. Аналогичные результаты приведены в [14] для электрохимической размерной обработки. Следовательно, этот диапазон размеров можно принять и для комбинированных процессов с наложением электрического поля. Тогда сила, действующая на гранулу при рассматриваемых видах комбинированной обработки (P_{rp}), может быть выражена зависимостью

$$P_{rp} = \frac{\rho_{\phi} r_{rp}}{r_{ув}}. \quad (15)$$

Технологические режимы обработки в кавитационной среде

По [11, Т. 2] скорость затухания ударной волны в воде менее 5 м/сек, поэтому за время τ_{ϕ} изменение пробега гранулы за счет торможения можно не учитывать

$$P_{rp} = am, \quad (16)$$

где a – ускорение гранулы; m – масса гранулы.

$$m = V_{rp} \cdot \gamma_{уд}, \quad (17)$$

где V_{rp} – объем гранулы; $\gamma_{уд}$ – удельная плотность материала гранулы.

Откуда средняя длина (L_1) пробега гранулы от единичного импульса составит

$$L_1 = ar_{\phi} = \frac{P_{\phi} r_{rp} \tau_{\phi}}{r_{ув} V_{rp} \gamma_{уд}}. \quad (18)$$

При длине L участка межэлектродного зазора от места обработки до выхода из него

гранулы количество импульсов должно быть не менее « n »

$$n = \frac{L}{L_1} = \frac{L r_{ув} V_{rp} \gamma_{уд}}{P_{\phi} r_{rp} \tau_{\phi}}. \quad (19)$$

Тогда частота следования импульсов

$$f = \frac{n}{\tau_{\phi}} = \frac{L r_{ув} V_{rp} \gamma_{уд}}{P_{\phi} r_{rp} \tau_{\phi}^2}. \quad (20)$$

Из [11, Т. 1] для RC-контуров

$$f = \frac{U_0 - U_{np}}{2,3 RC \lg(U_0 - U_k)},$$

где R – внутреннее сопротивление контура (известно из технической характеристики генератора импульсов); U_0 – напряжение на выходе генератора импульсов; U_{np} – напряжение пробоя межэлектродного промежутка, U_k – напряжение в конце пробоя. C – емкость конденсаторов. Приблизительно частота рассчитывается по формуле

$$f = \frac{0,837}{RC}. \quad (21)$$

Из (20) и (21) основной технологический параметр электроэрозионных генераторов

RC-схемы – емкость конденсаторов – рассчитывают по зависимости

$$C = \frac{1,2 L r_{ув} V_{rp} \gamma_{уд}}{P_{\phi} r_{rp} \tau_{\phi}^2 R}. \quad (22)$$

У современных тиристорных генераторов частота следования импульсов может рассчитываться по (20) и подаваться на разрядник непосредственно от генератора.

Заключение

Приведенный в работе механизм интенсификации массовыноса из межэлектродного пространства продуктов обработки содержит новый подход к интенсификации массовыноса путем импульсного воздействия на рабочую среду с целью формирования кавитационного течения жидкости. Это позволило ускорить удаление из зазора продуктов обработки, обеспечить стабильность процесса комбинированной обработки деталей со сложной геометрией межэлектродного пространства для течения рабочих сред. Приведены зависимости для расчета технологических параметров при обработке с кавитационным режимом течения рабочей среды.

Литература

1. Смоленцев В.П. Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М.: Машиностроение. 1978. 176 с.
2. А.С. № 944850. Способ электрохимической обработки импульсами технологического тока / В.П. Смоленцев, Т.П. Литвин, В.А. Перов, А.В. Попов, В.М. Антипов (СССР). Бюл. изобр. № 27, 1982.
3. А.С. № 1673329. Способ изготовления диэлектрических деталей с отверстиями / В.П. Смоленцев, В.Т. Трофимов, В.В. Трофимов (СССР). Бюл. изобр. № 32, 1991.
4. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий // Белград: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
5. Научные технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение, 2018. Т. 2. 818 с.
7. Пат. 2537409 Российская Федерация, 23Н. Инструмент и способ калибровки отверстий малого сечения в форсунках / Смоленцев В.П., Коптев И.И., Салтанаева Е.А., Смоленцев Е.В. Бюл. изобр. № 1. 2015.
8. Пат. 2454304 Российская Федерация, 23Н. Способ формирования импульсов тока при электрохимической обработке детали / Смоленцев В.П. и др. Бюл. изобр. № 18. 2012.
9. Патент 2581539 Российская Федерация, 23Н. Способ изготовления полости и отверстия в прессованной заготовке / Смоленцев В.П., Пишкова Н.В., Климова Г.Н. Бюл. изобр. № 11. 2016.
10. Сафонов С.В. Критериальная система проектирования и использования технологических процессов для повышения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 3. С.4-10.
11. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая шк., 1983.
12. Основы повышения точности электрохимического формообразования / под ред. И.И. Мороза. Кишинев: «Штиинца», 1997. 152 с.
13. Газизуллин К.М. Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. 243 с.
14. Либов Л.Я., Влазнев Е.И., Сомонов В.И. Установки подачи электролита при электрохимической обработке. М.: Машиностроение, 1981. 120 с.

Поступила 21.04.2019; принята к публикации 11.06.2019

Информация об авторах

Скрыгин Олег Викторович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8 960 137 02 22
Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8 903 655 99 70
Широкожухова Анна Александровна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8 920 455 59 59

MECHANISM OF COMBINED TREATMENT IN THE CAVITATION MODE

O.V. Skrygin, V.P. Smolentsev, A.A. Shirokzhukhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the mechanism of mass transfer intensification from the interelectrode space of the products during the combined processing of parts with the application of an electric field is considered. It is shown that the known ways for removing allowances by this method have significant limitations on improving the performance of parts manufacturing due to the reduction in the rate of removal of processed products from the zone of removal of the allowance. A new approach to the intensification of mass transfer is revealed by impulse action on the working environment in order to form a cavitation fluid flow. It is shown that such an approach to solving the mass transfer problem can significantly accelerate the removal of processing products from the gap and maintain the stability of the initial removal rate as they go deeper into the electrode blank. The conditions for the control of the cavitation flow regime of the working medium, which expand the possibilities for the effective use in engineering of combined processing methods, are given. The area of rational use of electrical processing methods in mechanical engineering with the use of cavitation flow of the working environment is substantiated. It is shown that new methods are technically and economically beneficial for obtaining deep through and blind holes in metal blanks. The developed technologies also provide the intensification of the process of separating blanks with a wire electrode-tool using the serial equipment already available at the enterprise, equipped with nozzles to feed a liquid working medium into the groove. In addition, the method is promising for forming complex elements with parts with an increased length of the interelectrode gap, where to ensure high technological performance it is required to ensure stable conditions for the mass production of processing products

Key words: combined treatment, cavitation flow, mechanism, impulse effects, mass transfer, technology

Reference

1. Smolentsev V.P. "Technology of electrochemical treatment of internal surfaces" ("Tekhnologiya elektrokhimicheskoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey"), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 176 p.
2. Smolentsev V.P., Litvin T.P., Perov V.A., Popov A.V., Antipov V.M. "Method of electrochemical processing pulses of technological current" ("Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki impul'sami tekhnologicheskogo toka"), authors certificate no. 944850 (USSR), 1982 bul., no. 27.
3. Smolentsev V.P., Trofimov V.T., Trofimov V.V. "Method of manufacturing dielectric parts with holes" ("Sposob izgotovleniya dielektricheskikh detaley s otverstiyami"), authors certificate no. 1673329 (USSR), 1991, bul. no. 32
4. Boyko A.F. "Effective technology and equipment for electroerosion piercing of precision micro holes" ("Effektivnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya elektroerozionnoy proshivki pretsizionnykh mikrootverstiy"), Belgrade, publishing house of BSTU, 2010, 314 p.
5. Suslov A.G. ed. "High-tech engineering technologies" ("Naukoymkie tekhnologii v mashinostroyenii"), Moscow, Mashinostroenie, 2012, 528 p.
6. Vasil'ev A.S., Kutin A.A. ed. "Handbook of a mechanical engineer" ("Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya"), Moscow, Innovatsionnoe mashinostroenie, 2018, 818 p.
7. Smolentsev V.P., Koptev I.I., Saltanaeva E.A., Smolentsev E.V. "The tool and method of calibration holes of small cross section in the nozzle" ("Instrument i sposob kalibrovki otverstiy malogo secheniya v forsunkakh"), patent 2537409 RF 23H, 2015, bul. no. 1
8. Smolentsev V.P. et al. "Method of formation of impulses of current in electrochemical processing of a part" ("Sposob formirovaniya impul'sov toka pri elektrokhimicheskoy obrabotke detali"), patent 2454304 RF 23H, 2012, bul. no. 8
9. Smolentsev V.P., Pishkova N.V., Klimova G.N. "Method of manufacturing the cavity and the hole in the pressed workpiece" ("Sposob izgotovleniya polosti i otverstiya v pressovannoy zagotovke"), patent 2581539 RF 23N, 2016, bul. no. 11.
10. Safonov S.V. "Criteria system of design and use of technological processes to improve the performance of the surface layer", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 3, pp. 4-10.
11. Smolentsev V.P. ed. "Electrophysical and electrochemical methods of materials processing" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1983.
12. Moroz I.I. ed. "Fundamentals of improving the accuracy of electrochemical shaping" ("Osnovy povysheniya tochnosti elektrokhimicheskogo formoobrazovaniya"), Kishinev, Shtiintsa, 1997, 152 p.
13. Gazizullin K.M. "Electrochemical dimensional processing of large parts in pulsating working environments" ("Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka krupnogabaritnykh detaley v pul'siruyushchikh rabochikh sredakh"), Voronezh State University, 2002, 243 p.
14. Libov L.Ya., Vlaznev E.I., Somonov V.I. "Installation flow of the electrolyte in electrochemical processing" ("Ustanovki podachi elektrolita pri elektrokhimicheskoy obrabotke"), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 120 p.

Submitted 21.04.2019; revised 11.06.2019

Information about the authors

Oleg V. Skrygin, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-960-137-0222

Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-903-655-9970

Anna A. Shirokzhukhova, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 8-920-455-5959

Правила для авторов

1. Принимаются к рассмотрению оригинальные научные статьи на русском языке общим объемом от 0,5 до 1 п. л. Материал статьи следует представить в электронном и печатном виде.

2. Текст статьи предоставляется в формате А 4. Поля страницы: верхнее - 2 см; нижнее - 2 см; правое - 2 см; левое - 2 см.

Шрифт текста - Times New Roman, межстрочный интервал 1,0. Размер шрифта основного текста 11. Аннотация, ключевые слова, благодарности, подрисовочные надписи, информация об авторах – 9 шрифт. Допускается в формулах, таблицах и рисунках уменьшить размер шрифта до 9.

3. Абзацный отступ - 0,8 см. Аннотация, ключевые слова и благодарности должны располагаться с дополнительным отступом 0,8 см от левого края.

4. На первой странице текста необходимо указать УДК (в левом верхнем углу листа от поля); название статьи (8-10 слов без каких-либо сокращений и аббревиатур, заглавными буквами), инициалы и фамилию автора(ов); полное наименование места работы автора(ов) с указанием города и страны; далее следуют аннотация, ключевые слова (от 5 до 10), а также благодарности (если есть).

5. Аннотация (реферат) к статье должна быть: информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье); компактной (укладываться в объем от 150 до 250 слов). Аннотация акцентирует научную новизну проведенных исследований и их результатов, отражает логику построения статьи (т.е. затрагивает основные этапы исследований). «Англоязычная» аннотация должна быть написана качественным английским языком.

6. Основной текст статьи должен быть структурирован по принципу выделения значимых его элементов (введение, постановка задачи, методы исследования, результаты, выводы или заключения и т.п.). Основной текст и литературу представляют на листе в две колонки шириной по 8 см каждая (межколоночное расстояние 1 см).

7. Таблицы располагаются по тексту. Если в статье одна таблица, то слово «Таблица» в названии не пишется. Если в статье несколько таблиц, то над

названием таблицы справа пишут «Таблица 1». Ссылка на таблицу в тексте оформляется следующим образом: «табл. 1».

8. Оформление рисунков в формате BMP. Подрисовочные подписи не входят в состав рисунков, а располагаются отдельным текстом. Рекомендуемая ширина рисунков - не более ширины колонки. Буквы и цифры на рисунке должны быть разборчивы. Если в статье несколько рисунков, то перед названием пишут «Рис. 1.». Ссылку на рисунок оформляют следующим образом: «рис. 1». Если в статье один рисунок, то слово «Рис. 1» под рисунком опускают.

9. Формулы нумеруют в круглых скобках (2), подстрочные примечания - арабскими цифрами.

10. Используемые в работе термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Все употребляемые авторами обозначения (за исключением общеизвестных констант типа e, h, c и т.п.) и аббревиатуры должны быть определены при их первом упоминании в тексте.

11. Все литературные ссылки в материале должны быть указаны в квадратных скобках - [1]. В тексте статьи должны присутствовать ссылки на все используемые литературные источники по мере их упоминания. Литература оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 Библиографическая ссылка. Желательно, чтобы в литературе самоцитирование не превышало 30%.

12. После литературы необходимо расположить информацию о каждом авторе, включающую расшифровку имени и отчества, обозначение ученой степени, звания и должности, полное наименование места работы, полный адрес организации, контактные данные (e-mail, номер телефона), а также ссылку на профиль автора в ORCID.

13. Далее следует англоязычный информационный блок, где содержится перевод заглавия, ФИО авторов, полного наименования мест работы авторов, аннотации, ключевых слов, благодарностей, литературы и информации об авторах.

14. Вместе со статьей в редакцию предоставляют заполненный лицензионный договор на право использования научной статьи и разрешение на публикацию (письмо и экспертное заключение о возможности открытого опубликования), которое должно быть заверено печатью и подписью ответственного лица.

Материалы представляются по адресу:

Россия, 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14.
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», к. 212
Редакция журнала «Вестник Воронежского государственного технического университета»
Тел.: (473)246-28-63; e-mail: vestnik@vorstu.ru

Дата выхода в свет: 28.06.2019.
Формат 60x84/8. Бумага писчая.
Усл. печ. л. 16,1. Уч.-изд. л. 13,1.
Тираж 500 экз. Заказ № 65.
Цена свободная

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Отпечатано: участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14